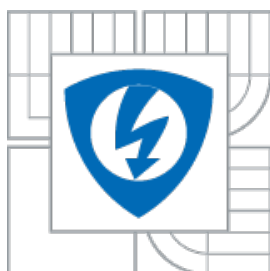




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

METODIKA VÝPOČTU ODPOROVÝCH PECÍ S NEPŘÍMÝM OHŘEVEM

CALCULATION OF RESISTANCE FURNACE WITH INDIRECT HEATING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

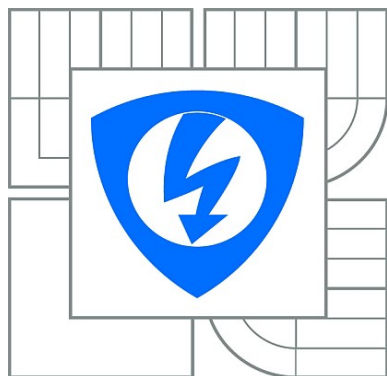
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JÁN BEZECNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. ILONA LÁZNIČKOVÁ, PH.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Ján Bezecný

ID: 119361

Rocník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Metodika výpočtu odporových pecí s nepřímým ohřevem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Odporový ohrev, odporová elektrotepelná zařízení, prenos tepla.
2. Popis metody výpočtu odporových pecí – základní požadavky, vstupní parametry.
3. Tepelný výpočet pece, spotřeba elektrické energie.
4. Aplikace výpočetní metody pro konkrétní zadání.

DOPORUCENÁ LITERATURA:

podle pokynu vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Ilona Láznicková, Ph.D

.doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

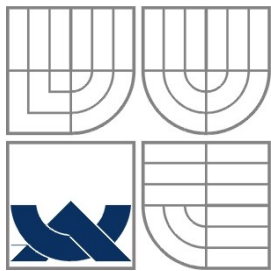
Predseda oborové rady

Bibliografická citace práce:

BEZECNÝ, J. *Metodika výpočtu odporových pecí s nepřímým ohřevem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalárska práca

Metodika výpočtu odporových pecí s nepriamym ohrevom

Ján Bezecný

vedoucí: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012



Brno

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Calculation of resistance furnace with indirect heating

by

Ján Bezecný

Supervisor: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Brno University of Technology, 2012, Brno

ABSTRAKT

Obsahem předložené bakalářské práce je stanovení metodiky výpočtu odporových pecí s nepřímým ohřevem. Při tvorbě metodiky jsme využili teoretické poznatky z oblasti proměny elektrické energie na teplo a jeho sdílení s okolním prostředím, a praktické zkušenosti z oblasti konstrukce odporových pecí a topných článků s ohledem na ekonomickou efektivitu výroby. Tyto poznatky jsme aplikovali při návrhu pece pro kalení klasického sodno-vápenatého skla s objemem vsázky do 2 dm³, které se v průmyslové praxi využívá především ve stavebnictví a také jako užitkové sklo. Takové pece využívají malé a středně velké firmy, které jsou zaměřeny na zákazkovou kusovou, resp. malosériovou výrobu. V rámci tvorby metodiky jsme na základě nadefinované velikosti a požadované teploty vsázky určili vhodný typ pece a typ výzdívky. Z hodnot tepla potřebného pro vyhřátí vsázky a pokrytí tepelných ztrát jsme stanovili požadovaný elektrický příkon, měrnou spotřebu elektrické energie a účinnost elektrické pece. Na závěr jsme navrhli rozměry a rozmístění topných článků.

KLÍČOVÉ SLOVA: odporová pec; nepřímý ohřev; vsázka; topné články; výzdívka; kalení skla

ABSTRACT

The content of the submitted thesis is to determine a methodology for calculation resistance furnaces with indirect heating. In developing of the methodology, we used the theoretical knowledges of converting an electricity to heat and its sharing with an environment, and practical experiences in a construction of resistance furnaces and heating elements, with respecting of economical efficiency of production. We were applied these knowledges in designing of furnace for hardening the classic sodium-calcium glass, with a volume of the batch 2 dm³, that are in industrial practice used mainly in construction, as well as the commercial glass. These furnaces are used by small and medium companies, that are focused on custom pieces, respectively small batch production. Within the methodology, we determined appropriate type of furnace and furnace lining, by defined required size and temperature of the batch. From the values of the heat, required for heating-up the batch and cover the heat losses, we calculated the the required electric power, specific consumption energy and efficiency of electric furnace. At the end we designed the dimensions and layout of heating elements.

KEY WORDS: resistance furnace; indirect heating; batch; heating elements; lining; hardening the glass

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK.....	10
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	11
ÚVOD.....	12
1. ZDIELANIE TEPLA. NEPRIAMY ODPOROVÝ OHREV	13
2. ELEKTRICKÉ PECE PRE NEPRIAMY ODPOROVÝ OHREV	15
2.1 SÚČASTI ODPOROVÝCH PECÍ A ICH DELENIE.....	16
2.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH TYPOV PECÍ Z HĽADISKA POHYBU VSÁDZKY.....	18
2.2.1 ODPOROVÉ PECE SO STABILNOU VSÁDZKOU.....	18
2.2.2 PRIEBEŽNÉ ODPOROVÉ PECE.....	20
3. REGULÁCIA VÝKONU A TEPLoty U ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ.....	21
4. VÝHREVNÉ ČLÁNKY – MATERIÁLY A KONŠTRUKCIA.....	23
4.1 KOVOVÉ MATERIÁLY.....	25
5. METODIKA VÝPOČTU ODPOROVÝCH PECÍ S NEPRIAMYM OHREVOM.....	27
5.1 VÝPOČET TEPLA AKUMULOVANÉHO VO VSÁDZKE.....	27
5.2 VÝPOČET DOBY OHREvu VSÁDZKY.....	28
5.3 VÝPOČET TEPELNÝCH STRÁT VÝMUROVKOU PECE.....	29
5.4 VÝPOČET CELKOVÉHO PRÍKONU ODPOROVEJ PECE.....	30
5.5 ELEKTRICKÝ VÝPOČET ODPOROVEJ PECE.....	31
5.5.1 VÝPOČET ROZMEROV A ROZMIESTNENIE VÝHREVNÝCH VODIČOV.....	31
5.5.2 STANOVENIE SKUTOČNÉHO POVRCHOVÉHO ZAŤAŽENIA VÝHREVNÝCH VODIČOV.....	33
6. NÁVRH ODPOROVEJ PECE.....	34
6. TEPELNÝ VÝPOČET ODPOROVEJ PECE.....	36
6. ELEKTRICKÝ VÝPOČET ODPOROVEJ PECE.....	38
ZÁVER.....	42
POUŽITÁ LITERATÚRA.....	43

ZOZNAM OBRÁZKOV

OBR. 3-1 ZAPOJENIE PECE PRI SKOKOVEJ REGULÁCIÍ.....	21
OBR. 6-1 DOVOLENÉ ZAŤAŽENIE VÝHREVNÝCH VODIČOV KANTHAL A1.....	39

ZOZNAM TABULIEK

TAB. 1 PREHEAD VSTUPNÝCH PARAMETROV VSÁDZKY	35
TAB. 2 PREHEAD VSTUPNÝCH PARAMETROV VÝMUROVKY.....	35
TAB. 3 VLASTNOSTI MATERIÁLU NIKROTHAL 80.....	36
TAB. 4 PREHEAD VYPOČÍTANÝCH PARAMETROV ODPOROVEJ PECE.....	41
TAB. 5 ROZMERY VÝHREVNÝCH ČLÁNKOV	41

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

PLC – Programovateľný automat (z angl.: programmable logic controller)

PID – proporciálny. Integračný a derivačný regulátor

ÚVOD

Odporové pece, využívajúce nepriamy ohrev, sú už desaťročia široko používanými zariadeniami pre tepelné spracovanie obrovskej škály materiálov. Za toto obdobie prešli veľkým vývinom. Postupnému zlepšovaniu vlastností tepelne izolačných materiálov a objavovanie nových materiálov pre výhrevné články, ktoré dokážu vygenerovať viac a viac tepla, umožňuje ich využitie v mnohých odvetviach hospodárstva, od strojárskoho a elektrotechnického priemyslu, výrobu dopravných prostriedkov, až po stavebníctvo a sklárstvo. Uplatnenie nachádzajú tiež pri výrobe šperkov a v lekárstve. Významnú úlohu zohrávajú aj vo výskumných a vývojových centrách, pri objave nových materiálov, či zlepšovaní vlastností materiálov už známych.

Požiadavky na odolnosť výrobkov počas ich funkcie, ktoré vyžadujú vyššie spomenuté odvetvia priemyslu a služieb, sú vysoké. Z toho dôvodu je nutná ich tepelná úprava zabezpečujúca väčšiu odolnosť voči mechanickému namáhaniu, ale aj pri vysokých teplotách, prípadne pri prudkých zmenách teploty. Podstatou tepelného spracovania je teda zlepšenie vlastností daného materiálu zmenou jeho fyzikálnych, prípadne chemických vlastností, pôsobením tepla. Medzi takéto materiály zaraďujeme napr. sklo, šamot, kovy i plasty.

Podmienkou pre návrh odporovej pece je znalosť podstaty zdieľania tepla, z ktorej sa následne vymedzujú podmienky, ktoré platia pre nepriamy odporový ohrev. Odporové pece je možné deliť podľa viacerých kritérií. Výsledkom je mnoho druhov odporových pecí, pričom každá je vhodná pre inú aplikáciu. Pre vysokú kvalitu výsledného produktu tepelného spracovania, ale tiež pre optimálne využitie výkonu odporovej pece je potrebná správna regulácia jej výkonu a teploty počas pracovného cyklu pece.

Taktiež je nutný správny výber materiálu a rozmerov výhrevných článkov. Použité materiály musia byť odolné voči vyšším teplotám, ako sú teploty, pri ktorých výrobky spracovávame. Nesmú byť nasadené v atmosfére, v ktorej hrozí oxidácia článku. V neposlednej rade treba brať ohľad aj na ich cenu, čo samozrejme platí pre všetky súčasti odporových pecí.

Obsahom tejto práce je popis postupu návrhu odporových pecí pre nepriamy ohrev. Existuje totiž viacero kritérií pre ich dimenzovanie a mnoho vplyvov, ktoré nemožno zanedbať. Zároveň treba brať ohľad na efektívnosť ich využitia a bezpečnosť ich prevádzky. Predovšetkým ide ale o to, aby doba ohrevu nebola príliš vysoká, príkon pece musí byť dostatočne využitý. Výmurovka a tepelná izolácia pece musia byť navrhnuté z trojakého hľadiska – nesmie dochádzať k zbytočným tepelným stratám, znehodnocovaniu izolácie v dôsledku nízkej tepelnej odolnosti a samozrejme musí byť zabránené riziku popálenia obsluhy na vonkajšom plášti pece.

Zvolený postup možno aplikovať na návrh pece pre ľubovoľne veľkú vsádzku. V našom prípade sme riešili odporovú pec na kalenie skla s rozmermi vsádzky 500 x 500 mm a s hrúbkou vsádzky 4 mm.

1. ZDIEĽANIE TEPLA

Teplu sa dá charakterizovať ako energia viazaná na hmotu. Prenáša sa z jednej látky na druhú, alebo len prechádzka jednou látkou, v smere gradientu teploty. Teplom môže byť aj energia elektromagnetického žiarenia o špecifickej vlnovej dĺžke. V tom prípade môže táto forma tepla existovať aj bez toho, aby bola naviazaná na hmotu. Vtedy sa ale častejšie používa pojem „žiarivá energia“, ktorá je nositeľom tepla medzi látkami.

Energia sa prenáša za účelom vytvorenia stabilného stavu – zaistenia rovnováhy. Dôvodom je minimalizácia energetickej bilancie stabilných systémov. To znamená, že aby bol systém stabilný, musí mať minimálnu energiu. Žiadne teleso avšak prakticky nemôže dosiahnuť úplny rovnovážny stav. Existujú dve hlavné príčiny: pravdepodobne stály pohyb hmoty a to, že konečná teplota všetkých telies je vyššia, než absolútna nula, čo spôsobuje neustále vyžarovanie.

Podstata prenosu tepla súvisí aj so zákonom zachovania energie. Keď jedno teleso, odovzdáva energiu (teplo), iné teleso ju musí zákonite prijímať. [3]

Prenos tepla možno charakterizovať vektorom hustoty tepelného toku \vec{q} , ktorého normálová zložka predstavuje množstvo tepla prechádzajúceho určitou plochou za jednotku času. Hustota tepelného toku je rozdielna pri prechode tepla pevnou, kvapalnou, či plynou látkou. Čiže automaticky závisí aj od spôsobu prenosu tepla, ktorý môže byť trojaký [3], [7] :

- **Kondukcia (vedenie)** – prenos tepla prebiehajúci vo všetkých skupenstvách, predovšetkým ale v tuhých látkach. Vedenie tepla je tým intenzívnejšie, čím je väčší gradient teploty T a súčiniteľ tepelnej vodivosti látky λ (vysvetlený nižšie). Túto skutočnosť popisuje Fourierov zákon

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T = -a \cdot \text{grad } (\rho \cdot c \cdot T) = -a \cdot \text{grad } i_v \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}; \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}}, \frac{\text{K}}{\text{m}} \right] \quad (1.1)$$

- **Prirodzená/nútená konvekcia (prúdenie)** – spôsob prenosu tepla (prirodzené alebo nútené), ktorý je charakteristické pre kvapaliny a plyny. Dá sa vyjadriť Newtonovým zákonom

$$q_p = \alpha_p \cdot (T_o - T_p) = \alpha_p \cdot \Delta T \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}; \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}, \text{K} \right] \quad (1.2)$$

kde α_p – koeficient prestupu tepla prúdením

T_o – teplota látky odovzdávajúcej teplo

T_p – teplota látky prijímajúcej teplo

- **Radiácia (sálenie)** – šírenie tepla bez prítomnosti hmoty prostredníctvom elektromagnetického žiarenia. Každé teleso určitú časť tepla pohltí, časť odrazí a časť prepustí, čo je vyjadrené pomernou pohltivosťou, odrazivosťou a priepustnosťou. Vlnová dĺžka žiarenia, ktoré sa prejavuje ako sálavé teplo, sa pohybuje v rozsahu 780 nm – 10 μm , čomu zodpovedá oblasť infračerveného žiarenia.

Prenos tepla sálaním je vyjadrený Stefan – Boltzmannovým zákonom, podľa ktorého je hustota vyžiareného tepelného toku daná emisivitou telesa ε (konštanta, závisiaca od vlnovej dĺžky vyžiarenej energie a od teploty telesa), Stefan – Boltzmannovou konštantou ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), teplotou vyžarujúceho telesa ($T > 0 \text{ K}$) a teplotou priezračného plynného prostredia ($T_0 \geq 0 \text{ K}$). Pre šedé telesá platí vzťah

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; -, \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}, \text{K}] \quad (1.3)$$

V prúdeom médiu prebieha súčasne aj prenos tepla vedením. Výslednú hustotu tepelného toku získame sčítaním hustoty tepelného toku pre konvekciu a kondukciiu.

Prenos tepla látkou alebo určitým prostredím charakterizujú aj dve ďalšie veličiny – súčiniteľ tepelnej vodivosti λ a súčiniteľ teplotnej vodivosti a . Sú to materiálové charakteristiky, ktorých hodnota je závislá na teplote.

Súčiniteľ tepelnej vodivosti je veličina závislá na teplote, ktorá udáva množstvo tepla, ktoré prejde danou plochou pri istom teplotnom spáde. Znamienko „+“ platí pre tepelné izolanty, keramiku, plyny a zliatiny, znamienko „-“ platí pre kovy a kvapaliny (s výnimkou vody a glycerínu)

$$\lambda = \lambda(\vartheta) = \lambda(0) \cdot (1 \pm b \cdot \vartheta) \quad [\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}; \text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}] \quad (1.4)$$

kde: $\lambda(0)$, $\lambda(\vartheta)$ – súčiniteľ tepelnej vodivosti pri teplote $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (v tabuľkách sa uvádza aj hodnota pri teplote $20 \text{ }^\circ\text{C}$) a pri teplote ϑ .

b – teplotný koeficient,

Súčiniteľ teplotnej vodivosti charakterizuje rýchlosť zmeny teploty v látke. Z nasledujúceho vzťahu vyplýva, že čím väčšie budú hodnoty veličín v menovateli (merná tepelná kapacita c a hustota ρ), tým pomalšie sa bude meniť teplota daného telesa [7]

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = a(\vartheta) \quad \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}; \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}}, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.5)$$

Podstatou odporového ohrevu je využitie Jouleovho tepla, ktoré vzniká prechodom elektrického prúdu odporovými článkami umiestnenými v priestore peci. Odporový ohrev môže byť priamy a nepriamy. Pri priamom odporovom ohreve sa využíva prenos tepla prevažne vedením a prúdením, kedy prúd prechádza priamo vsádzkou. Pri nepriamom ohreve prechádza prúd výhrevnými článkami, z ktorých vyžaruje teplo do priestoru pece a ohrieva vsádzku. Okrem odporového ohrevu sa v priemysle využíva veľa iných spôsobov tepelného spracovania vsádzky – predovšetkým sa používajú palivové a indukčné pece.

Celkové Jouleovo teplo indukované vo výhrevných článkoch je priamo úmerné ich odporu a prúdu, ktorý nimi prechádza za dobu ohrevu vsádzky

$$Q_1 = R \cdot I^2 \cdot t_o \quad [\text{J}; \Omega, \text{A}, \text{s}] \quad (1.7)$$

kde: R – odpor výhrevného článku,

I – prúd tečúci výhrevným článkom,

t_o – doba ohrevu vsádzky.

2. ELEKTRICKÉ PECE PRE NEPRIAMY ODPOROVÝ OHREV

V zariadeniach s nepriamym odporovým ohrevom vzniká teplo vo výhrevných článkoch umiestnených priamo v peci. Do vsádzky sa potom prenáša prevažne sálaním a prúdením atmosféry v peci.

Okrem toho existujú ešte dva druhy odporových zariadení – elektrické odporové vane (prenos tepla kondukciou a konvekciou; vsádzka je ponorená v tekutine) a infražiariče (prenos tepla sálaním).

Pri porovnaní rôznych typov ohrevu môžeme zistiť, že napríklad rýchlosť ohrevu u odporových pecí s nepriamym ohrevom môže byť päť až desaťnásobne vyššia, ako u palivových pecí. Investičné náklady sú nižšie, avšak prevádzkové náklady, vzhľadom na cenu elektrickej energie a cenu palív, nie sú zanedbateľné ani u odporových, ani u palivových pecí.

Jednou z hlavných nevýhod palivových pecí sú oveľa vyššie tepelné straty v porovnaní s odporovými pecami. Rovnica tepelnej bilancie u palivových pecí pozostáva z viacerých zložiek, ktorými sú najmä: tepelný tok spalín, tepelný tok získaný rekuperáciou, straty vyšľahnutím plameňa, straty otvormi v peci, akumulovaný tok, straty stenami, užitočný tok na vsádzku a straty tepla cez komínové teleso. Nahradením zdroja energie za elektrickú zredukujeme zložky tepla na tri – akumulovaný tok, užitočný tok na vsádzku, a tepelné straty výmurovkou pece. Pre porovnanie, účinnosť elektrických pecí s nepriamym odporovým ohrevom sa pohybuje v rozmedzí 50 – 80 %, pričom u palivových pecí je to len 25 – 40 %. [10]

Nemôžeme zanedbať ani ďalšie výhody odporových pecí, ako sú napríklad možnosť presnejšej regulácie teploty u elektrických pecí, vplyv na životné prostredie a bezpečnosť.

Výhod oproti indukčným peciam je tiež viacero. Indukčné pece sa obmedzujú len na ohrev vodivých materiálov. Elektrickú sieť taktiež zaťažujú jalovou zložkou výkonu, preto je nutná jeho kompenzácia. Z konštrukčného hľadiska musí byť zabezpečené tienenie pece voči rušeniu elektromagnetickým poľom a proti stratám energie. Nevýhodou odporových zariadení oproti indukčným je nižšia účinnosť (u indukčných pecí sa účinnosť pohybuje okolo 90 %). [7]

Ďalšie výhody elektrických odporových pecí s nepriamym ohrevom:

- pohotovosť (rýchly štart, 24h, dostupnosť),
- veľká variabilita výkonov,
- jednoduchosť komplexnej automatizácie,
- malé náklady na údržbu.

2.1 SÚČASTI ODPOROVÝCH PECÍ A ICH DELENIE

Súčasti elektrických pecí sú [5] :

- žiaruvzdorná výmurovka (šamotové diely, dosky z keramického vlákna),
- tepelná izolácia (rohože z minerálneho alebo keramického vlákna),
- vonkajší plášť pece (oceľové plechy a profily, liatina a oceloliatina),
- výhrevné články,
- pohony mechanizmov pre zakladanie vsádzky do pece a vyberanie vsádzky z pece, pohony pre ovládanie dverí pece a i.

Pece bývajú ďalej vybavené zariadeniami pre výrobu ochrannej atmosféry alebo zabezpečenie vákua, prístrojmi pre meranie a reguláciu teploty, prípadne aj riadenými zdrojmi prúdu.

Odporové pece delíme podľa viacerých kritérií [3], [5] :

Podľa zloženia atmosféry v peci:

- s normálnou atmosférou (vzduch),
- s riadenou atmosférou (dusík, argón, vodík, CO₂, hélium...),
- s vákuom – vákuové pece.

Podľa cirkulácie atmosféry na:

- Pece s prirodzeným prúdením vzduchu
 - patria sem najmä komorové pece,
 - výhrevné články bývajú umiestnené na bočných stenách alebo v dne,
 - musí u nich existovať tienenie medzi vsádzkou a článkami, aby nedošlo k jej prehriatiu,
 - majú nízky koeficient zdieľania tepla, a teda aj malú rýchlosť ohrevu a slabý výkon.
- Pece s núteným prúdením vzduchu
 - ich účinnosť je vyššia vďaka ventilátoru v hornej časti pece, ktorý nasáva teplý vzduch a posieľa ho do spodnej časti pece (tento obeh sa nazýva uzavretý),
 - často sa jedná o sušiacie pece, v ktorých sa dodáva do obehu väčšie množstvo vzduchu pre vykrytie strát a kvalitnejší proces sušenia.
 - maximálna teplota: 200 – 300 °C,
 - vnútorná konštrukcia: oceľ; žiaruvzdorná výmurovka nie je nutná,

-
- pri veľkých rozmeroch pece a vysokých požiadavkách na rovnomernosť ohrevu sa ventilátor a výhrevné telesá umiestňujú do zvláštnej komory – ohrievača vzduchu.

Podľa pohybu vsádzky:

- so stabilnou vsádzkou – nepohyblivou (periodické pece),
- so vsádzkou prechádzajúcou cez pec – priebežné pece.

Podľa použitia v praxi pre:

- tepelné spracovanie a tavenie kovov,
- smaltovanie,
- tavenie, kalenie a chladenie skla,
- laboratória, pre domácnosti a potravinárstvo,
- sušenie,
- soľné kúpele,
- infračervený ohrev.

Podľa teploty tepelného spracovania delíme pece na:

- nízkoteplotné do 600 °C,
- stredoteplotné od 600 °C do 1100 °C,
- vysokoteplotné nad 1100 °C.

Nízkoteplotné pece

Teplo sa v nízkoteplotných peciach prenáša prevažne konvekciou. Patria sem sušiacie, niektoré popúšťacie pece, a tiež pece pre tepelné a chemickotepelné spracovanie kovova plastov.

Stredoteplotné pece

Prenos tepla je v stredoteplotných peciach realizovaný buď prevažne sálaním pre vyššie teploty alebo konvekciou pre nižšie teploty. Konvekcia prevažuje nad radiáciou len v prípade núteného prúdenia atmosféry. Patria sem napríklad všetky kaliace pece.

Vysokoteplotné pece

Prenos tepla vo vysokoteplotných peciach prebieha výlučne sálaním vo vákuovej vykurovacej komore, v niektorých prípadoch sálaním a konvekciou.

Pri vysokých teplotách nemožno použiť na vnútorné konštrukcie žiaruvzdorné legované materiály. Nahrádzajú sa karbidom kremíku alebo keramikou. Atmosféru pece tvorí buď vákuum alebo ochranná atmosféra. Najpoužívanějšíe materiály sú molybdén, niób, wolfrám alebo grafit.

Steny bývajú zhotovené z troch vrstiev – prvá je vysokožiaruvzdorná s veľkým obsahom oxidu hlinitého, druhá má tepelne izolačnú funkciu, používajú sa hlavne rôzne druhy šamotov. Tretia vrstva je izolačná.

U pecí s grafitovými výhrevnými článkami býva výstelka vyrobená z koksovej alebo grafitovej drte.

So statických pecí medzi ne patria predovšetkým komorové, šachtové a valcové, z priebežných sú to karuselové a krokovacie pece.

Využitie nachádzajú v oblasti výskumu a laboratórnych testov, na spekanie dentálnej keramiky (zubné mostíky zo zirkóniových oxidov, pre spekanie technického a quarz skla, materiálové skúšky v metalurgii a iné špeciálne aplikácie). [5], [7], [9]

2.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH TYPOV ODPOROVÝCH PECÍ Z HĽADISKA POHYBU VSÁDZKY

2.2.1 ODPOROVÉ PECE SO STABILNOU VSÁDZKOU

Pece sú z konštrukčného hľadiska tvorené vonkajším plášťom (je tvorený "U" plechmi, "L" profilmi z nehrdzavejúcej ocele), izoláciou z ľahčených šamotových tehliel, minerálneho alebo keramického vlákna, exponované časti výmurovky môžu byť prípadne zo žiaruvzdorného betónu, čo je zárukou vysokej odolnosti a dlhej životnosti. Otváranie dverí je zväčša (elektro)hydraulické alebo zaistené pomocou elektrického pohonu. V prípade rizika úniku agresívnych látok zo vsádzky bývajú výhrevné články chránené tzv. muflou z nerezovej žiaruvzdornej ocele, ktorá zvyšuje mechanickú odolnosť výhrevných vodičov, životnosť pece a prispieva k väčšej odolnosti voči korózií. Aby sa zabráňovalo kondenzácií pár a následnej oxidácií, je vhodné priestor pece odvetrávať pomocou digestoru. Najčastejšie sa využívajú tieto typy odporových pecí [2], [3], [5], [7], [9] :

Komorové pece patria k najstarším typom elektrických odporových pecí. Vďaka svojej univerzálnosti sú ešte stále často používané. Vsádzka sa môže zavádzať horizontálne alebo vertikálne. Vyrábajú sa pre teploty až do 1400 °C.

Nízkotepelné komorové pece sa využívajú na sušenie, predohrev, vytvrdzovanie, zahoríevanie, polymerizáciu a vulkanizáciu, pre nízkotaviteľné kovy, úpravy materiálov v plastikárskom, gumárenskom, elektrotechnickom či automobilovom priemysle pri teplotách do 300 °C. Ich objem bývava desiatky až tisíce litrov, príkon sa pohybuje v jednotkách až desiatkach kW.

Stredotepelné a vysokotepelné pece sa využívajú v keramickom a sklárskom priemysle, šperkárstve a pre smaltovanie (príkon je v jednotkách kW, pre sklo aj v desiatkách kW) a pre

spracovanie kovov a ocele sa výkon môže vyšplhať až do 100 kW. Objem týchto pecí sa pohybuje v desiatkach až stovkách litrov.

Pri ich výrobe sa dôraz kladie na nízke tepelné straty, nízku spotrebu elektrickej energie a rýchly nábeh na požadovanú teplotu. Nevýhodou sú relatívne veľké tepelné straty, ktoré dosahujú 20 až 40 % z hodnoty ich menovitého príkonu.

Vozokomorové pece sú obdobou komorových pecí s tým rozdielom, že vsádzka sa zasúva do pece na pohyblivom vozíku. Bývajú nasadené do prevádzok s ťažkými pracovnými podmienkami, čo si vyžaduje robustnú oceľovú konštrukciu. Ich objem sa pohybuje v tisíckach litrov. Stredoteplotné vozokomorové pece sa využívajú pri spracovaní plastov, pri povrchových úpravách, či v gumárenstve. Vysokoteplotné nachádzajú uplatnenie v sklárskom a metalurgickom priemysle. Príkony týchto pecí bývajú často v stovkách kW, čo pri napätí 400 V môže znamenať záťaž stoviek ampérov. Z toho dôvodu sú pripojené na samostatný rozvádzač. Tepelná účinnosť je porovnateľná s komorovými pecami.

Šachtové pece sa používajú pre ohrev dlhých a objemných vsádzok do teploty 1100 °C, ktoré sa vkladajú zhora pomocou žeriavu. Vo valcových šachtových peciach je možné použiť k ohrevu dutej vsádzky prídavné axiálne výhrevné teleso vložené do jej dutiny. Bývajú zapustené v zemi až do hĺbky 10 m.

Pre zmenšenie strát akumulovaného tepla vo výstelke sa predmety často pomaly ochladzujú mimo pece v špeciálnych, tepelne izolovaných šachtách. Tepelné straty sú už menšie, cca. 15 – 25 %. Príkony sú v desiatkach až stovkách kW, objem môže byť aj viac ako 1000 l.

Zvonové pece dosahujú z výkonového hľadiska hodnoty rádovo stoviek kW. Tepelné straty v tvoria len približne 10 – 15 % celkového tepla akumulovaného v peci, vďaka ich konštrukčnému prevedeniu.

Elevátorové pece majú komoru, ktorá je zospodu otvorená a pevne uložená na stĺpoch vo výške 3 – 4 m nad podlahou. Do tejto komory sa zospodu zavádza vsádzka pomocou zdvižnej plošiny (vozík alebo nistej). Využívajú sa predovšetkým pre vysokoteplotné aplikácie (až do 1900 °C). Ich výhoda spočíva v tom, že je v nich podstatne homogénnejšie teplotné pole, ako u iných pecí. Straty naprázdno a straty akumulovaným teplom výstelky vozíku sú podobné ako u zvonových pecí, v rozsahu 10 – 20 % menovitého výkonu.

Kelímkové taviace pece sa delia na dva druhy – stacionárne a sklopné. V druhom prípade sa tavenina prelieva do transportnej alebo udržiavacej pece k následnému spracovaniu. Uhol sklopenia sa pohybuje maximálne do hodnoty 100°. Kelímok je kovovej alebo keramickej konštrukcie, na dne pece je vytvorený havarijný výtokový otvor pre prípad poškodenia kelímku.

Konštruujú sa pre tavenie kovov alebo zliatin pri teplotách až do 1300 °C, alebo vytavovanie vosku pri teplotách do 900 °C. Príkon kelímkovej pece môže byť až 100 kW, objem až niekoľko stoviek litrov.

2.2.2 PRIEBEŽNÉ ODPOROVÉ PECE

Priebežné odporové pece sa dimenzujú pre nižšie teploty a neprerušovanú prevádzku. Sú konštrukčne náročnejšie, dosahujú však vyššiu kapacitu výroby a menšiu mernú spotrebu elektrickej energie. Často na tieto pece naväzujú tzv. chladiace tunely zaisťujúce riadené

ochladzovanie vsádzky. Niekoľko pecí môže tvoriť jeden kompletne mechanizovaný a automatizovaný celok. Podľa druhu mechanizmu dopravy vsádzky sa využívajú najčastejšie tieto pece [3], [5], [7] :

Pásové pece sa používajú na ohrev relatívne malých častí do 900 °C. Uzavretý dopravný pás zo žiaruvzdornej vysokolegovanej chrómniklovej ocele (zhotovený z kovového pletiva, razených dosiek, či reťazí) je natiahnutý medzi dvoma bubnami a zabezpečuje spojitý pohyb vsádzky.

Pás aj bubny smú byť umiestnené v peci, takže nedochádza k úniku akumulovaného tepla. Straty sa mierne zvyšujú kvôli nutnosti chladenia bubnov. Alternatívou k tomuto riešeniu je umiestnenie spodnej úrovne pásu a poháňacích bubnov mimo pásma s vysokou teplotou. Z dôvodu tepelnej rozťažnosti sa pri ohreve pás predlžuje, preto sa spodná časť pásu necháva voľne visieť.

Valčkové pece sú určené taktiež pre teploty do 900 °C. Vsádzka sa pohybuje spojitou po valčekovej dráhe pomocou elektrického reťazového pohonu. Zaťažené valčeky sa za chodu nesmú zastaviť, inak by došlo k ich deformáciám. Preto máva elektrický pohon valčekov obvykle záložný zdroj pre prípad výpadku siete.

Karuselové pece sa konštruujú pre najvyššie teploty, pretože hnacie mechanizmy sú úplne mimo priestoru s pracovnou teplotou. Vlastné teleso pece je rotačné. Doba ohrevu (výhradne kruhovej) vsádzky sa mení v závislosti na zmene rýchlosti otáčania podlahy.

Krokové pece sa používajú na spracovanie rozmerných predmetov. V týchto peciach nie je možné použiť ochrannú atmosféru, vzhľadom k nedokonalému utesneniu pracovnej komory.

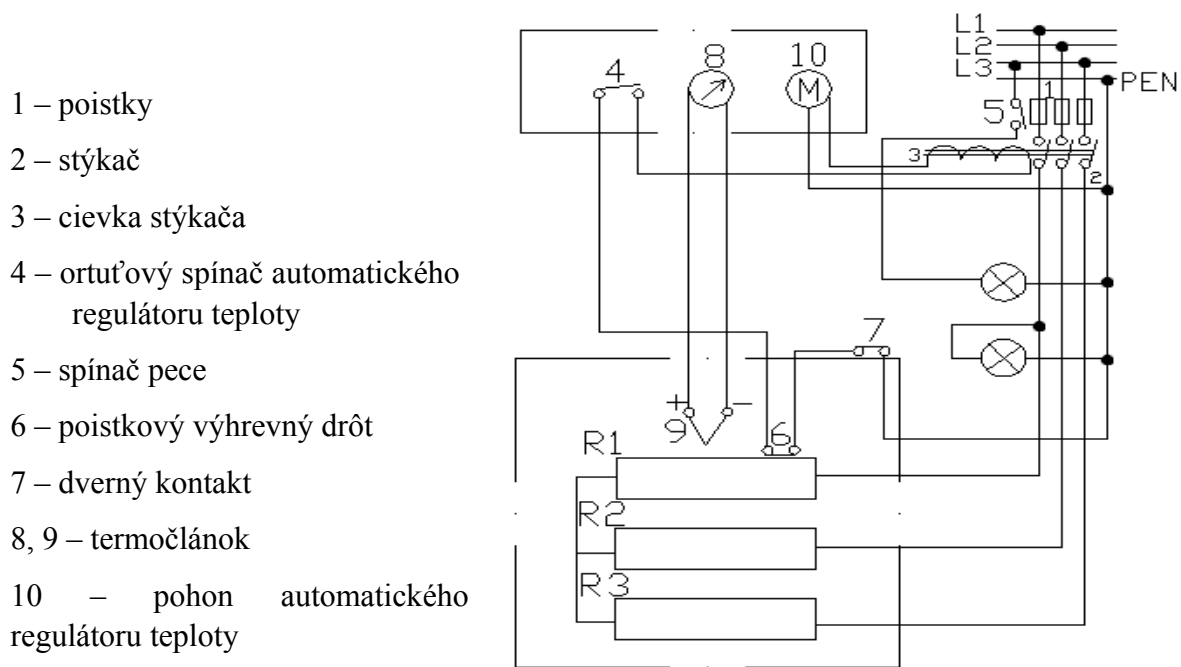
Ďalej existujú aj narážacie pece (do 1000 °C), bubnové pece (spracovanie drobných vsádzok), pece s pulzujúcim dnom, tunelové pece (chladenie skla, smaltovanie), preťahovacie pece (tepelné spracovanie drôtov a pásov z farebného skla).

3. REGULÁCIA VÝKONU A TEPLoty U ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ

Úlohou regulácie teploty a príkonu je trvalé a presné udržiavanie týchto veličín v pracovnom priestore pece, resp. reagovanie na ich zmeny podľa predom pripraveného programu. Regulácia môže byť dvojaká – skoková alebo plynulá. Pritom treba brať ohľad na symetrické zaťaženie distribučnej sústavy.

Skoková regulácia teploty – funguje na buď na princípe spínania celého príkonu pece (vtedy sa nazýva aj jednopólová regulácia teploty – schéma je na obr. 3-1), alebo na princípe prepínania odporových článkov medzi zapojeniami hviezda a trojuholník (v tom prípade sa jedná o dvojpólovú reguláciu teploty – obr. 3-1).

Princíp jednopólovej regulácie teploty: pri zapnutí spínača pece sa zopne pomocný obvod pozostávajúci z cievky stýkača, automatického regulátoru teploty (jeho súčasťou je ortuťový spínač, pohon regulátoru a termočlánok), dverného kontaktu a poistkového výhrevného drôtu. Pri nabudení spínacej cievky sa zapnutím stýkača pripoja výhrevné články na elektrickú sieť. Pri dosiahnutí požadovanej teploty sa prekllopí ortuťový spínač regulátoru teploty, čím sa preruší ovládací obvod a následne stýkač odpojí pec od siete. Nevýhodou tohto zapojenia sú prúdové nárazy pri spínaní pece, ktoré znižujú životnosť výhrevných telies.



Obr. 3-1: Zapojenie pece pri skokovej regulácii (pri dosiahnutí požadovanej teploty sú výhrevné články odpojené od siete) [5]

Plynulá regulácia teploty – v tomto prípade je riadenie zaistené akčným členom s riaditeľným výstupným napätím a konštantnou frekvenciou. Základnými prvkami sú tyristory zapojené antiparalelne na privode pece. Zaisťujú plynulú a tichú prevádzku s minimálnym elektromagnetickým rušením okolitých zariadení.

Využitím plynulej regulácie dochádza k zrovnomeneniu teplotného priebehu, maximálne až do hodnoty $\pm 5\%$. Pri požiadavke na vyššiu presnosť a rovnomernosť ohrevu sú pece vybavené samostatne regulovateľnými výhrevnými pásmi. [5]

Riadiaci systém pecí je vytvorený na báze PLC s modulovými regulátormi. Komunikácia prebieha po sériovom rozhraní. Regulátor riadi teplotu, plynú atmosféru a koordináciu pohybov.

Pre reguláciu chodu pece sa vyrábajú programovateľné PID regulátory s presnosťou ± 2 °C. Je možné ich prepojiť s PC prostredníctvom sériového rozhrania RS232 alebo RS485.

Meranie teploty je autonómne, prostredníctvom logických vstupov. Využívajú sa termočlánky – najčastejšie typy „S“, „K“ a pre vysokoteplotné pece sa využíva typ „B“. Súčasťou pecí sú aj limitné jednotky, ktoré zvlášť sledujú prekročenie medznej teploty vlastnými senzormi. Ak sa tak stane, pec sa odpojí od napájania.

V peci sa taktiež využívajú kyslíkové sondy pre sledovanie plynnej atmosféry, kedy sú výstupy regulátora pripojené na elektromagnetické ventily zdroja atmosféry, a kontaktné snímače hladín.

Cyklus priebehu vsádzky nielen pecou, ale aj celou linkou zaisťuje riadiaca jednotka regulačného systému na základe programu, signálu polohy manipulátorov, signálu polohy pece (polohu obvykle sleduje inkrementálny snímač) a signálu o priebehu programu.

4. VÝHREVNÉ ČLÁNKY

Výhrevné odporové články sú zdrojom tepla v odporových peciach s nepriamym ohrevom. Teplo vzniká prechodom prúdu odporovým materiálom článku. Ich konštrukcia a umiestnenie musí spĺňať podmienku čo najlepšieho prestupu tepla do pracovného priestoru pece. (nemali by si cloniť, sálať navzájom na seba apod.). Ich výber závisí od pracovnej teploty, spôsobu prevádzkovania pece, od mechanických požiadaviek a od možného vplyvu pecnej atmosféry. Podľa konštrukcie ich delíme na otvorené alebo uzavreté výhrevné články, podľa materiálu na kovové a nekovové (nekovové sa konštruujú výhradne ako uzavreté články).

Všeobecné požiadavky na výhrevné články:

- Žiaruvzdornosť pri pracovnej teplote článku, ktorá je závislá na tvorbe povrchovej vrstvy, ktorá chráni kov pred oxidáciou. Rozrušujú ju prudké zmeny teploty. Jej priľnavosť sa dá zvýšiť legovaním základného materiálu.
- Dostatočná mechanická pevnosť za tepla.
- Odolnosť proti chemickým vplyvom pracovného prostredia (hlavne u pecí pracujúcich s umelou atmosférou).
- Veľká rezistivita pre použitie väčších prierezov a menších dĺžok vodičov a pre možnosť pripojenia priamo na napájaciu sieť (dlhšie vodiče sú drahšie a majú kratšiu životnosť).
- Malý teplotný súčiniteľ odporu, aby odoberaný výkon bol približne rovnaký v studenom aj teplom stave. Čisté kovy majú teplotný súčiniteľ cca. $0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, takže pri ohreve o 1000°C u nich vzrastá odpor na štvornásobok oproti studenému stavu. Z toho dôvodu sa uvádza pec zapína pri zníženom napätí, alebo sa používajú články vyrobené so zliatin.
- Stálosť rezistivity po celú dobu života článku (pri starnutí článkov a zvyšovaní merného odporu sa regulačným transformátorom zvyšuje napätie).
- Malá teplotná dĺžková rozťažnosť (v prípade možnosti väčšieho predĺženia článkov je vhodné ponechať rezervu).
- Dobrá spracovateľnosť.

Otvorené výhrevné články

Otvorené výhrevné články majú voľne vyžarujúci povrch meandrovitého, špirálovitého alebo slučkovitého tvaru. Môžu byť buď zavesené na stenách pece na keramických alebo kovových hákoch, na keramických nosníkoch upevnených o vnútorné steny pece, alebo

umiestnených v žlaboch. Taktiež sa môžu jednoducho umiestňovať do drážok, vytvorených na vnútorných stenách pece.

Uzavreté výhrevné články

Vyhrievací vodič je úplne oddelený od vsádzky i od vonkajšej atmosféry, obvykle hermeticky, cez izolant, ktorý je vystužený kovovým krytom. Vodiče sú teda chránené pred mechanickými aj chemickými vplyvmi. Tieto články sa používajú ako ponorné výhrevné telesá pre rýchly ohrev kvapalín.

Výhrevná špirála sa v dutine žiaruvzdornej kovovej trubky umiestňuje spoločne s jemným keramickým práškom na báze oxidu horečnatého, ktorý má výborné elektrické izolačné vlastnosti a veľmi dobre vedie teplo. Rúrka sa následne zužuje v pretáhovacom lise, prípadne splošťuje a rôzne tvaruje. Zvýšenie odovzdaného tepla sa dá dosiahnuť zväčšením povrchu článkov rebrami nalisovanými na kryciu rúrku.

Uloženie uzavretých výhrevných článkov:

- uloženie článkov v podlahe alebo nisteji – najjednoduchšie; je uložený v kanáli a prikrytý plechom dobrou tepelnou vodivosťou,
- uloženie článkov v stenách – vinutie v rúrke vo výrezoch steny; rúrky v plytkých žlaboch na stenách,
- uloženie článkov v strope – náročnejšie, ak je v polootvorených kanáloch; u menších pecí sa riešenie zjednodušuje, ak je možné umiestniť do pece silitový článok ako osový prvok.

Uzavreté výhrevné články sa bežne využívajú nielen v priemysle, ale aj v domácnostiach. Najznámejšie sú tzv. Backerove rúrky, ktoré sú súčasťou mnohých domácich spotrebičov – platničky varičov, žehličky, práčky, zásobníky TUV, ponorné špirály a pod.). [3], [5], [8]

4.1 KOVOVÉ MATERIÁLY

Medzi kovové materiály pre výhrevné články patria nemagnetické a magnetické zliatiny kovov Ni, Cr, Fe, Al, ktoré sa využívajú v nízko a stredoteplotných peciach. Vo vysokoteplotných peciach sa využívajú čisté kovy, ale aj nekovové materiály. Výhodou magnetických a nemagnetických zliatin je predovšetkým ich cena a dobrá mechanická a tepelná odolnosť. Nevýhodou je najnižšia možná prevádzková teplota v ochrannej atmosfére oproti iným kovovým materiálom [1], [3].

Pri návrhu odporových pecí treba rešpektovať aj vzájomné vplyvy medzi článkami a ich keramickými nosičmi. Ich zanedbanie môže viesť k podstatnému zníženiu životnosti odporových článkov. Nosiče článkov by mali obsahovať čo najmenší podiel oxidov síry a železa alebo SO_2 , ktoré rozrušujú hlavne články z austenitických zliatin. Naopak mali by mať vysoký podiel Al_2O_3 a vysokú homogenitu, ktorá znižuje miestne prehriatia [8].

Austenitické zliatiny

Austenitické zliatiny sú nemagnetické zliatiny železa, chrómu a niklu. Patria medzi najstaršie materiály. Žiaruvzdornosť je zaistená povrchovou vrstvou ochranného oxidu chromitého Cr_2O_3 , ktorý taktiež zlepšuje chladiace podmienky. Tvorí sa od približne 800 – 900

°C. Poskytuje nižšiu ochranu proti nauhličovaniu. Má tendenciu sa odlupovať, čo môže znečistiť vsádzku. Patria medzi najkvalitnejšie vďaka nasledovným vlastnostiam:

- vysoká žiaruvzdornosť,
- dobrá tvárnosť a zvariteľnosť (narozdiel od feritických aj za studena),
- odolnosť voči častým spínaniam,
- veľká rezistivita,
- malý teplotný súčiniteľ odporu,
- časová stálosť,
- vhodné pre použitie s dusíkovou atmosférou, avšak nevhodne na ne vplýva striedanie oxidačných a redukčných prostredí,
- podľa zloženia použiteľné do 1250 °C.

Vyrábajú sa pod obchodnými názvami Nikrothal, Chromitherm, Nichrom, Cronix, Cronifer a iné [1],[3],[7].

Feritické zliatiny

Jedná sa o magnetické zliatiny chrómu, hliníku a železa, chránené povrchovou vrstvou Al_2O_3 , ktorý drží na základnom materiáli tesnejšie ako Cr_2O_3 . Je viac odolný voči nauhličovaniu a je skvelý elektrický izolant. Pri častých teplotných cykloch môžu vzniknúť v povrchovej vrstve trhliny, cez ktoré uniká hliník (avšak pomalšie ako chróm u austenitických zliatín).

Výhody:

- vysoká žiaruvzdornosť,
- vyššia životnosť a rezistivita ($1,4 \mu\Omega \cdot \text{m}$ pri 20 °C) ako u austenitických zliatin, avšak nižšia mechanická pevnosť
- malý teplotný súčiniteľ odporu,
- použiteľnosť až do 1375 °C (vďaka prítomnosti hliníku; v zásade platí, že čím je väčší obsah železa v článku, tým je maximálna prevádzková teplota nižšia),
- narozdiel od austenitických zliatín nie sú citlivé na síru.

Nevýhody:

- nevhodné pre teploty do 1000 °C (dovtedy neexistuje ochranná vrstva Al_2O_3).
- zvyšovanie krehkosti pri častom spínaní,
- nestála pevnosť za tepla, najmä nízka pevnosť v ťahu,
- veľká teplotná dĺžková rozťažnosť (vekom sa môžu vodiče predĺžiť až o 40 %, čo môže spôsobiť pri zlej konštrukcii medzizávitový skrat),
- keramické nosiče výhrevných článkov nesmú obsahovať oxidy železa a alkálie (vodné sklo).

Vyrábajú sa buď tavením, alebo technológiou práškovej metalurgie, ktorá je síce cenovo náročnejšia, ale takto vyrobené články majú vyššiu pevnosť za tepla, a maximálna teplota sa mierne zvýši na 1425 °C.

Obchodné názvy: Kanthal, Alsichrom, Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal, a iné. Ich zloženie je približne rovnaké. [1], [3]

Čisté kovy

V špeciálnych vysokoteplotných aplikáciach sa využívajú drahé, ťažkotaviteľné kovy ako platina, rhódium, wolfrám, niób, tantal a molybdén. Nevýhodou je, že sú použiteľné len vo vákuu alebo redukčnej atmosfére (oxidácia je škodlivá hlavne pre molybdén, wolfrám a tantal). Niektoré sú veľmi citlivé na mechanické namáhanie, ale aj na prudké teplotné zmeny. Doba každej etapy tepelného spracovania musí byť preto pomalý a riadený.

Molybdén sa používa rozsahu teplôt od 1400 °C do 2000 °C, atmosféru tvorí suchý vodík, pary liehu, argón alebo hélium. Pri vysokých teplotách taktiež výrazne klesá jeho pevnosť, preto tieto výhrevné články musia mať veľmi silné podpory. Má však tendenciu veľmi silno reagovať s bežnými typmi pecnej keramiky. Jeho teplotný súčiniteľ odporu je vysoký, preto molybdénové články sa napájajú cez regulačný transformátor, čo má za následok vyššie investičné náklady.

Wolfrám sa používa vo vákuu alebo v redukčnej atmosfére (max. do 2500 °C). Má podobné vlastnosti ako molybdén s tým rozdielom, že je horšie tvarovateľný.

Tantal možno použiť len v inertnej atmosfére alebo vo vákuu (max. do 2400 °C). Výhodou je veľká tvárnosť a odolnosť voči mechanickým otrasom. Nevýhodou je vysoká cena.

Konštantán, Nikelín a Manganín sú špeciálne zliatiny, ktorých odpor sa takmer s teplotou nemení. Používajú sa hlavne pri nízkych teplotách v spotrebičoch o nízkom príkone.

Platina má vysoký teplotný súčiniteľ odporu, čo má za následok vysoké prúdové nárazy za studena (podobne ako molybdén). Využíva sa len vo vákuu pri teplotách okolo 1450 °C (uzavreté platinové články až do 1700 °C).

Rhódium má oproti platine lepšiu pevnosť za tepla, vyššiu teplotu tavenia (1960 °C). Na druhej strane je však extrémne krehký a má nevýhodnú odporovú krivku.

Zliatiny platiny a rhódia – využívajú sa najčastejšie s obsahom 10 – 20 % rhódia vzhľadom na prevádzkovú teplotu, krehkosť a cenu. Využitie platiny, rhódia a ich zliatin je však kvôli vysokej cene na ústupe. [1], [3], [7]

5. METODIKA VÝPOČTU ODPOROVÝCH PECÍ

Dimenzovanie elektrických odporových pecí pozostáva z dvoch hlavných fáz – z tepelného a elektrického výpočtu.

Spočiatku je však nutné si stanoviť vstupné parametre vsádzky – jej materiál a rozmery. Následne podľa zvoleného druhu tepelného spracovania vieme určiť aj konečnú teplotu ohrievaného produktu. Pri ujasnení týchto požiadaviek následne dokážeme stanoviť konštrukčný typ použitej pece a najvhodnejší materiál pre výmurovku a tepelnú izoláciu. Treba mať predstavu aj o použití špeciálnej atmosféry v peci, aby nedochádzalo k nežiadúcim chemickým reakciám medzi výhrevnými článkami, vsádzkou a pecnou atmosférou. Vsádzka musí byť rovnomerne ohrievaná, v opačnom prípade by sa to mohlo odraziť na jej kvalite. Nesmie ani dochádzať k zbytočným stratám tepla. Zanedbanie uvedených požiadaviek by viedlo k zníženej efektívnosti výroby a vyšším prevádzkovým nákladom pece.

Tepelný výpočet zahŕňa stanovenie množstva tepla potrebného pre ohrev vsádzky na danú teplotu a určenie času, za ktorý sa vsádzka na túto teplotu ohreje. Nesmie sa taktiež zanedbať výpočet tepelných strát výmurovkou, určený na základe teplotného spádu skrz materiály, z ktorých výmurovka pozostáva, a taktiež tepelného odporu týchto materiálov. Na základe týchto hodnôt sa určuje celkový príkon pece, jej elektrická účinnosť a merná spotreba pece, čiže množstvo energie, ktoré treba na ohriatie 1 kg vsádzky.

Posledným krokom pri návrhu odporovej pece je elektrický výpočet odporovej pece, pod ktorým si môžeme predstaviť určenie rozmerov výhrevných článkov, ich povrchového zaťaženia a nakoniec aj ich rozmiestnenia v peci. Súčasťou elektrického výpočtu je aj spôsob pripojenia pece na elektrickú sieť. V prípade trojfázového pripojenia na elektrickú sieť (využíva sa u pecí s príkonom nad 5 kW) treba brať ohľad na symetrické zaťaženie elektrickej siete, ktoré sa zaistí počtom výhrevných článkov na fázový vodič. Využíva sa zapojenie článkov do hviezdy, alebo do trojuholníka. U jednofázových pecí sa články radia sériovo za sebou. Nevýhodou je však dlhší nábeh, a preto sa využívajú najmä na laboratórne účely. Môžeme sem zaradiť aj návrh regulátoru teploty, ten však nie je predmetom tejto práce, a preto sa mu nebudem venovať.

5.1 VÝPOČET TEPLA AKUMULOVANÉHO VO VSÁDZKE

Celkové teplo, potrebné pre ohrev vsádzky z teploty T_0 na teplotu T_1 , sa skladá z viacerých zložiek. Najväčší podiel majú na ňom dve zložky – teplo potrebné pre ohrev vsádzky Q_{vs} a tepelné straty výmurovkou ΔP_{cs} . Výpočet tepelných strát výmurovkou bude uvedený neskôr.

$$Q_{vs} = k \cdot m_{vs} \cdot c_{vs} \cdot (T_1 - T_0) \quad \left[\text{J}; \text{kg}, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \text{K} \right] \quad (5.1)$$

kde k – súčiniteľ bezpečnosti v rozsahu $k = \langle 1,1; 1,5 \rangle$. Zahŕňa potrebu zvýšeného výkonu vzhľadom na zhoršenie tepelnej izolácie výstelky, tepelné straty, pokles napájacieho napätia, zvýšenie odporu článkov a pod. [3]

Menšou zložkou tepla, akumulovaného v pecnom priestore, je teplo potrebné pre ohrev atmosféry a pomocných materiálov. Určí sa obdobným spôsobom, ako teplo Q_{vs} , čiže z kalorimetrickej rovnice pre danú látku, avšak v tejto práci som sa ho rozhodol zanedbať vzhľadom k jeho malému podielu na celkovom vyprodukovanom teple.

Tepelné straty výmurovkou pece sa stanovujú zvlášť počas ohrevu, chladnutia, prestoja a výdrže vsádzky. Pre návrh pecí sú najdôležitejšie práve straty počas ohrevu, ostatné sú buď zanedbateľné, resp. nemajú veľký vplyv na návrh pece (straty počas ochladzovania), keďže vsádzka sa ochladzuje mimo priestoru pece. Z toho dôvodu budem uvažovať len straty počas doby ohrevu.

Čas pracovného cyklu teda najviac ovplyvňuje doba ohrevu. Tá je nepriamo úmerná rastúcej hustote tepelného toku. Ak je hustota tepelného toku príliš vysoká, tak príkon pece nie je primerane využitý. Empiricky je dokázané, že príkon pece je dostatočne využitý, ak uvažujeme teplotu vsádzky rovnú 80 – 90 % teploty výhrevných článkov. [7]

5.2 VÝPOČET DOBY OHREUVU VSÁDZKY

Doba ohrevu vsádzky nezávisí len od hustoty tepelného toku, ale aj od rýchlosti zmeny teploty na vsádzke, ktorá je daná tepelnou veľkosťou vsádzky. Tá sa určí na základe Biotovho kritéria podobnosti (Bi) a Starkovho kritéria podobnosti (Sk), určujúcich výmenu tepla na rozhraní „prostredie – vsádzka“.

Hodnota spomenutých kritérií pre tepelne drobnú vsádzku (v prípade tepelne masívnej vsádzky platia obrátené nerovnosti) [7]:

pri sálavom a sálavo – konvekčnom režime

$$Sk = \left(\frac{C_s}{100} \right) \cdot \frac{T^3}{100^3} \cdot \left(\frac{l}{\lambda} \right) < 0,15 \quad \left[-; \frac{W}{m^2 \cdot K^4}, K, m, \frac{W}{K \cdot m} \right] \quad (5.2)$$

pri konvekčno – sálavom (sálavo – konvekčnom) režime

$$Bi = \left(\frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \right) < 0,25(0,5) \quad \left[-; \frac{W}{m^2 \cdot K}, m, \frac{W}{K \cdot m} \right] \quad (5.3)$$

kde l – charakteristický rozmer telesa (u bežných tvarov ohrievaných produktov je to hrúbka produktu)

Samotný výpočet doby ohrevu pre tepelne drobnú vsádzku, odvodený z rovnice energetickej bilancie a z rovnice pre výmenu tepla sálaním (príp. konvekciou, záleží to na teplote tepelného spracovania), sa stanoví podľa vzťahu:

$$t_o = \frac{c_{vs} \cdot m_{vs}}{C_s \cdot S_{vs}} \cdot \frac{100}{\frac{T_p^3}{100^3}} \cdot \left(0,25 \cdot \ln \frac{1 + \phi_k}{1 - \phi_k} + 0,5 \cdot \arctan \phi_k - 0,25 \cdot \ln \frac{1 + \phi_0}{1 - \phi_0} - 0,5 \cdot \arctan \phi_0 \right)$$

$$\left[\text{s}; \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \text{kg}, \frac{\text{W}}{\text{K}^4 \cdot \text{m}^2}, \text{m}^2 \cdot \text{K} \right] \quad (5.4)$$

kde C_s – koeficient sárania medzi článkami a vsádzkou. Jeho hodnotu je možné nájsť v tabuľkách, alebo vypočítať ako súčin emisivity telesa a Stefan-Boltzmannovej konštanty

Φ_0, Φ_k – pomerné teploty vsádzky na začiatku (teplota vsádzky je T_0) a na konci ohrevu (teplota vsádzky je T_1) pri konštantnej teplote výhrevných článkov T_p

$$\phi_0 = \frac{T_0}{T_p} \quad \phi_k = \frac{T_1}{T_p} \quad [-; \text{K}, \text{K}] \quad (5.5)$$

Výpočet doby ohrevu tepelne masívnej vsádzky je rozdielny predovšetkým v tom, že v tomto prípade uvažujeme aj vnútornú výmenu tepla po priereze vsádzky. Určí sa na základe hodnoty Fourierovho kritéria podobnosti, charakteristického rozmeru telesa l a súčiniteľa tepelnej vodivosti a podľa vzťahu:

$$t_o = \frac{Fo \cdot l^2}{a} \quad \left[\text{s}; -; \text{m}; \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (5.6)$$

$$\text{kde: } Fo = \frac{a \cdot t_{op}}{l^2} \quad - \text{ Fourierovo kritérium podobnosti;} \quad (5.7)$$

Fourierovo kritérium podobnosti je avšak jednoduchšie určiť pomocou Budrinových diagramov pre strednú rovinu steny a pre povrch steny, pretože netreba odhadovať približný čas ohrevu t_{op} , pretože pri jeho zlom odhade sa môže výpočet skomplikovať. Tieto diagramy znázorňujú závislosť Fourierovho kritéria na Biotovom kritériu podobnosti a na pomernej teplote vsádzky. Pomerná teplota vsádzky je pri malej hrúbke rovnaká pre povrch steny a aj pre strednú rovinu steny ohrievaného telesa. Určuje sa podľa vzťahu[7]:

$$\phi_{vs} = \frac{(\vartheta_p - \vartheta_1)}{(\vartheta_p - \vartheta_0)} \quad [-; \text{K}, \text{K}] \quad (5.8)$$

5.3 VÝPOČET TEPELNÝCH STRÁT VÝMUROVKOU PECE

Výpočet tepelných strát výmurovkou pece vychádza z analógie medzi tepelnými a elektrickými veličinami. Je potrebné stanoviť tepelný odpor jednotlivých vrstiev výmurovky

$$R_t = \frac{h_{vým.}}{\lambda_{vým.}} \quad \left[\frac{\text{K} \cdot \text{m}^2}{\text{W}}; \text{m}, \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}} \right] \quad (5.9)$$

kde: $h_{vým}$ – hrúbka výmurovky

$\lambda_{vým}$ – súčiniteľ tepelnej vodivosti materiálu výmurovky pri prevádzkovej teplote

Celkový tepelný odpor R_c sa následne určí ako súčet tepelných odporov výmurovky a tepelne izolačného materiálu (ak je potrebný). Pri požiadavke na veľkú presnosť sa zohľadňuje aj

tepelný odpor ocelového plášt'a pece a súčiniteľ prestupu tepla konvekciou medzi plášťom a okolitým prostredím. Vzhľadom na vysokú tepelnú vodivosť ocele a malú hrúbku plášt'a, tepelný odpor tejto vrstvy zanedbávame.

Výpočet teplotného spádu v jednotlivých častiach izolácie a výmurovky je analogický k určeniu úbytkov napätia ΔU na jednotlivých (sériovo radených) rezistoroch v elektrickom obvode

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta U_c} = \frac{R_i}{R_c} \Rightarrow \frac{\Delta T_i}{\Delta T_c} = \frac{R_{ti}}{R_{tc}} \Rightarrow \Delta T_i = \Delta T_c \cdot \frac{R_{ti}}{R_c} \quad \left[\text{K}; \text{K}, \frac{\text{K} \cdot \text{m}^2}{\text{W}}, \frac{\text{K} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \right] \quad (5.10)$$

kde ΔT_i – teplotný spád v i -tej časti výmurovky,

ΔT_c – celkový teplotný spád skrz výmurovku, tepelnú izoláciu a ocelový plášť pece,

R_{ti} – tepelný odpor v i -tej časti výmurovky.

V prípade, že nedochádza k prekročeniu najvyššej povolenej prevádzkovej teploty použitých materiálov, môžu sa stanoviť jednotkové tepelné straty výmurovkou pece, ktoré sa vzťahujú na jednotku plochy

$$P_{js} = \frac{\Delta T_c}{R_{tc}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}; \text{K}, \frac{\text{K} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \right] \quad (5.11)$$

Celkové straty P_{cs} sa následne určí ako súčin jednotkových tepelných strát a výpočtovej prestupovej plochy celej pece. Výpočtová plocha sa stanoví pomocou geometrického priemeru vnútornej a vonkajšej plochy každej steny pece. [7]

$$P_{cs} = P_{js} \cdot S_{vp} = P_{js} \cdot \sqrt{(S_{vonk} \cdot S_{vnut})} \quad \left[\text{W}; \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^2 \right] \quad (5.12)$$

kde: S_{vp} – výpočtová prestupová plocha,

S_{vonk} – plocha vonkajšej steny,

S_{vnut} – plocha vnútornej steny v pracovnej komore.

5.4 VÝPOČET CELKOVÉHO PRÍKONU ODPOROVEJ PECE

Užitočný príkon pece, sa určuje z množstva tepla potrebného pre ohrev vsádzky na danú teplotu Q_{vs} za stanovenú dobu ohrevu t_o (doba ohrevu sa niekedy určuje aj ako podiel výrobnosti pece a hotnosti vsádzky). Vychádza sa z predpokladu, že pec je vyhriata na teplotu vsádzky

$$P_{už} = \frac{Q_{vs}}{t_o} \quad \left[\text{W}; -, \text{J}, \text{s} \right] \quad (5.13)$$

Celkový príkon pece P_{celk} je potom súčtom užitočného príkonu a tepelných strát výmurovkou.

Aby bol tepelný výpočet pece kompletný, je treba ešte určiť ďalšie dva základné prevádzkové parametre periodických odporových pecí [7]:

Merná spotreba elektrickej energie:

$$W = \frac{Q_{vs}}{m_{vs} \cdot t_o} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}}; \text{J}, \text{kg}, \text{s} \right] \quad (5.14)$$

kde m_{vs} – hmotnosť vsádzky.

Elektrická účinnosť pece:

$$\eta = \frac{P_{už}}{P_{celk}} \quad [-; \text{J}, \text{J}] \quad (5.15)$$

kde $P_{už}$ – užitočný príkon pece,

P_{celk} – celkový príkon pece.

5.5 ELEKTRICKÝ VÝPOČET ODPOROVEJ PECE

Elektrickým výpočtom sa stanovujú rozmery kovových hrevných článkov, ich počet, rozmiestnenie vo vykurovacej komore a predovšetkým ich povrchové zaťaženie. Pri voľbe nekovových článkov sú ich rozmery dané výrobcom, Ich dimenzovanie sa teda obmedzuje len na ich správne rozmiestnenie a počet kusov, ktorý je daný podielom celkového príkonu pece a príkonu jedného výhrevného článku. [7]

V ďalšom texte budem popisovať len výpočet parametrov kovových výhrevných článkov, vzhľadom na konkrétny druh tepelného spracovania a očakávaný nízky príkon pece.

Výpočet parametrov kovových výhrevných článkov spočíva v stanovení priemeru, prierezu, dĺžky, odporu a hmotnosti výhrevného vodiča (posledný parameter je potrebné viesť pre overenie mechanickej odolnosti vodiča, to však nie je predmetom tejto práce).

Vstupnými veličinami pre elektrický výpočet je spravidla príkon pece (pri jednofázovom pripojení), alebo v našom prípade príkon pripadajúci na jeden fázový vodič (pri trojfázovom pripojení). Ďalšími veličinami sú napájacie napätie a ideálne povrchové zaťaženie výhrevných článkov.

5.5.1 VÝPOČET ROZMEROV A ROZMIESTNENIE VÝHREVNÝCH VODIČOV

Vzťah pre výpočet priemeru odporového drôtu kruhového prierezu sa odvodzuje z pomeru indukovaného Joulovho tepla vo výhrevnom vodiči Q_1 (podľa vzťahu (1.7)) k teplu, ktoré sa dokáže odvieť povrchom tohto vodiča Q_2 [3]:

$$Q_2 = p_z \cdot S_{el} \cdot t_o \quad \left[\text{J}; \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \text{m}^2, \text{s} \right] \quad (5.16)$$

Priemer odporového drôtu kruhového prierezu sa teda následne vypočíta podľa vzťahu:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{(1 \cdot P_{celk})^2}{(3 \cdot U_{zdr})^2} \cdot \frac{\rho_{R680}}{p_{id}} \cdot \frac{4}{\pi^2}} \quad \left[\text{m}; \text{W}, \frac{\Omega \cdot \text{m}}{\text{m}}, \text{V}, \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (5.17)$$

kde P_{celk} – príkon pece,

U_{zdr} – napätie článku (v prípade zapojenia článkov do trojuholníka sa dosádza združená hodnota),

ρ_R – rezistivita pri prevádzkovej teplote.

Výpočet dĺžky 1 fázového vodiča

$$l_{1F} = \frac{3 \cdot \pi \cdot U_{zdr}^2 \cdot d_{zv}^2}{4 \cdot P_{celk} \cdot \rho_{R680}} \quad \left[\text{m}; \text{V}, \text{mm}, \text{W}, \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right] \quad (5.18)$$

Hmotnosť 1 fázového vodiča (v tvare drôtu)

$$m_{\text{el}} = \rho_{\text{el}} \cdot l_{1F} \cdot S_{\text{el}} \quad \left[\text{kg}; \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \text{m}, \text{m}^2 \right] \quad (5.19)$$

Z uvedených vzťahov možno usúdiť, že s nižším napätím sa zväčšuje minimálny možný prierez vodičov a zároveň sa skracuje ich dĺžka. Prakticky to má za následok zvýšenie životnosti a lepšiu inštaláciu v pracovnom priestore pece.

Po určení rozmerov je dôležité vhodne rozmiestniť výhrevné články v peci a skontrolovať, či je to vôbec možné, vzhľadom na ich dĺžku. Pre túto časť výpočtu je potrebné zvolať si primerané stúpanie závitů a stredný priemer špirály. Prvý parameter sa volí ako 2 – 2,5 – násobok priemeru drôtu, ten druhý ako jeho 5 – 7 – násobok. Ďalej sa počítajú nasledovné parametre [1]:

Dĺžka jedného závitů, odvodená jednoducho pomocou Pytagorovej vety

$$L_{1z} = \sqrt{s^2 + [\pi \cdot (D - d_{zv})]^2} \quad (5.20)$$

Počet závitů dostaneme, keď podelíme dĺžku nosníku stúpaním závitů

$$n_z = \frac{L_{nos}}{s} \quad (5.21)$$

Vynásobením počtu závitů dĺžkou jedného nosníku zistíme dĺžku vodiča na jednom nosníku. Následne po podelení celkovou dĺžkou vodiča a dĺžkou vodiča na jednom nosníku určíme počet nosníkov.

$$n_{nos} = \frac{l_{1F}}{L_{drôt/nos}} \quad (5.22)$$

Pre kontrolu je ešte nutný posledný krok, kontrola zvolenej hodnoty stúpania závitů a následne ostatných vypočítaných hodnôt. Všetky hodnoty kontrolujú podľa vyššie uvedených vzťahů, avšak stúpanie závitů sa prepočítava podľa zložitejšieho vzťahu, v ktorom je zohľadnená, okrem priemeru drôtu, aj dĺžka jedného fázového výhrevného vodiča, dĺžka nosníka a počet nosníkov a stredný priemer špirály

$$s_{prepoč} = \frac{\pi \cdot (D - d)}{\sqrt{\frac{l_{1F}^2}{(n_{nos} \cdot L_{nos})^2} - 1}} \quad (5.23)$$

5.5.2 STANOVENIE SKUTOČNÉHO POVRCHOVÉHO ZATÁŽENIA VÝHREVNÝCH VODIČOV

Povrchové zaťaženie p_z udáva maximálnu prípustnú hustotu výkonu na povrchu výhrevného článku. Inými slovami sa dá taktiež povedať, že nepriamo vyjadruje na jednej strane energetické využitie článku, a na druhej strane jeho životnosť. Jeho ideálna hodnota je uvedená v katalógových listoch výrobcu pecí alebo výhrevných článkov. Tá sa následne po určení rozmerov vodičov porovnáva so skutočným povrchovým zaťažením vodičov podľa vzťahu [7]

$$p_z = \frac{P_{celk}}{(3 \cdot \pi \cdot d_{zv} \cdot l_{1F})} \quad \left[\frac{W}{m^2}; W, m^2 \right] \quad (5.24)$$

Jeho veľkosť závisí aj na tvaru vinutia špirál, ktoré majú menšie dovolené povrchové zaťaženie ako rovné drôty.

6. NÁVRH ODPOROVEJ PECE

Pre návrh odporovej pece som zvolil komorovú pec na kalenie bežného sodno-vapenatého skla, v praxi široko používaného, najmä v stavebníctve a pri konštrukciách dopravných prostriedkov.

Technológia kalenia skla spočíva v jeho zahriatí na teplotu 620 – 680 °C a následnom prudkom ochladení vzduchovou sprchou. Po tejto úprave zostane vo vnútri skla ťažné pnutie, zatiaľ čo na povrchu vznikne tlakové napätie. Vďaka tomu sa zvýši odolnosť skla voči mechanickým nárazom a prudkým teplotným zmenám, dokonca až päťnásobne. Ak aj napriek tomu dôjde k prasknutiu skla, rozpadne sa na veľmi malé kúsky, ktoré nie sú ostré. Preto sa takto upravené sklo využíva tam, kde sú kladené zvýšené nároky na bezpečnosť, mechanickú odolnosť a tepelnú odolnosť – predovšetkým v stavebníctve, automobilovom a leteckom priemysle (kalené sklo je napríklad veľmi dobrou ochranou pri požiaroch). [12]

Vstupnými parametrami pre návrh odporovej pece sú rozmery vsádzky. Podľa nich následne volím konštrukčné rozmery pece. Výhrevné články sa najskôr zahrejú na teplotu $\vartheta_p = 680\text{ °C}$ ($T_p = 953,15\text{ K}$). Keď sa dosiahne v peci teplota tepelného spracovania, zavedie sa do nej sklo, ktoré sa rýchlo zahreje z teploty $\vartheta_0 = 25\text{ °C}$ ($T_0 = 298,15\text{ K}$) na teplotu $\vartheta_l = 650\text{ °C}$ ($T_l = 923,15\text{ K}$). Pri menších peciach trvá ohrev rádovo niekoľko minút, u veľkých kaliacich liniek je to 10 – 20 minút. Doba nábehu je teda očividne kratšia, keďže je v tej chvíli pec prázdna. Z toho dôvodu nebudeme dobu nábehu uvádzať vo výpočte.

Na tepelnú izoláciu pece sú použité dosky z keramického, hliníkokremičitanového vlákna SIBRAL Standard, vonkajší plášť o hrúbke 5 mm je vyrobený z legovanej ocele.

Ako zdroj tepla navrhujeme použiť výhrevné články z nemagnetickej feritickej zliatiny KANTHAL A1, vzhľadom na nízku teplotu tepelného spracovania a vyššie dovolené povrchové zaťaženie, ako u vodičov z austenitických zliatin. Navinuté budú v tvare špirály na keramických nosníkoch, upevnených na protiľahlých stenách pece. Nosníky sú vyrobené z KORDIERITU, ktorý má vynikajúcu odolnosť voči prudkým teplotným nárazom, a vyhovuje aj z hľadiska maximálnej prevádzkovej teploty, ktorá je 1200 °C.

Tab.1: Prehľad vstupných parametrov vsádzky

Parameter			Vsádzka
Šírka	\check{s}_{vs}	[mm]	500
Dĺžka	d_{vs}	[mm]	500
Hrúbka (výška)	h_{vs}	[mm]	4
Povrch steny	S_{vs}	[m ²]	0,25
Objem	V_{vs}	[m ³]	0,001
Hmotnosť	m_{vs}	[kg]	2,6
Hustota	ρ_{vs}	[kg.m ⁻³]	2600 ⁽³⁾
Merná tepelná kapacita	c_{vs}	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	840
Emisivita	ε_{vs}	[-]	0,94
Súčiniteľ tepelnej vodivosti pri teplote 25 °C	$\lambda_{25,vs}$	[W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	0,8
Súčiniteľ tepelnej vodivosti pri teplote 700 °C	$\lambda_{700,vs}$	[W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	0,8063

Tab.2: Prehľad vstupných parametrov výmurovky [4], [11]

Parameter			Výmurovka
Šírka	$\check{s}_{vým}$	[mm]	1000/1300 ⁽¹⁾
Dĺžka	$d_{vým}$	[mm]	1000/1300 ⁽¹⁾
Hrúbka	$h_{vým}$	[mm]	300
Povrch steny	$S_{vým}$	[m ²]	1/1,69 ⁽¹⁾
Hmotnosť	$m_{vým}$	[kg]	72
Hustota	$\rho_{vým}$	[kg.m ⁻³]	300
Merná tepelná kapacita (pri teplote 900 °C)	$c_{vým}$	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	969
Emisivita	$\varepsilon_{vým}$	[-]	0,875 ⁽²⁾
Súčiniteľ tepelnej vodivosti pri teplote 700 °C	$\lambda_{700,vým}$	[W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	0,11 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Vnútrotný rozmer/Vonkajší rozmer

⁽²⁾ Stredná hodnota medzi emisivitou 2 hlavných zložiek - Al₂O₃ ($\varepsilon_{Al_2O_3} = 0,9$) a Si₂O₃ ($\varepsilon_{Si_2O_3} = 0,85$).

⁽³⁾ Stredná hodnota medzi súčiniteľom tepelnej vodivosti pre 600 °C a 800 °C

Tab.3: Vlastnosti materiálu KANTHAL A1 [6]

Materiálová vlastnosť			Nikrothal 80
Maximálna prevádzková teplota	$\vartheta_{max,el}$	[°C]	1400
Teplota tavenia	$\vartheta_{tav,el}$	[°C]	1500
Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti	β_{el}	[K ⁻¹]	$14 \cdot 10^{-6}$
Teplotný súčiniteľ pre zväčšenie rezistivity, pre teplotu 680 °C	α_{el}	[-]	1,02
Súčiniteľ tepelnej vodivosti	$\lambda_{,el}$	[W·K ⁻¹ ·m ⁻¹]	21
Emisivita	$\varepsilon_{,el}$	[-]	0,7
Rezistivita pri teplote 20 °C	$\rho_{R20,el}$	[$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]	1,45
Rezistivita pri teplote 680 °C	$\rho_{R680,el}$	[$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]	1,479
Merná tepelná kapacita pri 700 °C	c_{el_700}	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	730
Hustota	ρ_{el}	[kg·m ⁻³]	7100

6.1 TEPELNÝ VÝPOČET ODPOROVEJ PECE

V tejto časti práce aplikujem postup, uvedený v predchádzajúcej kapitole, na konkrétny návrh odporovej pece

Pre stanovenie užitočného príkonu pece je nutné určiť množstvo tepla, potrebného pre ohrev vsádzky na teplotu $\vartheta_l = 650$ °C ($T_l = 923,15$ K), a čas, po ktorý bude vsádzka vystavená sáľaniu tohto tepla z povrchu výhrevných článkov

Množstvo tepla, potrebné pre ohrev skla na teplotu , určíme zo vzťahu (5.1)

$$Q_{vs} = k \cdot m_{vs} \cdot c_{vs} \cdot (\vartheta_l - \vartheta_0) = 1,2 \cdot 2,6 \cdot 840 \cdot (650 - 25) = 1638000 \text{ J}$$

Pre výpočet doby ohrevu musíme najskôr vypočítať koeficient sáľania C_s , a následne tepelnú veľkosť vsádzky

Koeficient sáľania, zohľadňujúci vplyv vzájomného sáľania medzi vsádzkou, výmurovkou a výhrevnými článkami vypočítame pomocou emisivity každého z materiálov a Stefan-Boltzmannovej konštanty

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_0 \cdot \varepsilon_{el}} + \frac{1}{C_0 \cdot \varepsilon_{vs}} + \frac{1}{C_0 \cdot \varepsilon_{vym}} - \frac{1}{C_0}} = \frac{1}{\frac{1}{5,67 \cdot 0,7} + \frac{1}{5,67 \cdot 0,94} + \frac{1}{5,67 \cdot 0,875} - \frac{1}{5,67}} = 2,15 \frac{\text{W}}{\text{K}^4 \cdot \text{m}^2} \quad (6.1)$$

Keďže sa jedná o stredoteplotnú pec, teplo sa v tomto prípade bude šíriť prevažne sálaním a z menšej časti aj konvekciou. Tepelná veľkosť vsádzky sa teda stanoví pomocou Starkovho kritéria podobnosti, uvedeného vo vzťahu (5.2)

$$Sk = \frac{C_s}{100} \cdot \frac{T_1^3}{100^3} \cdot \frac{l}{\lambda_{vs,650}} = \frac{2,15}{100} \cdot \left(\frac{923,15}{100}\right)^3 \cdot \frac{0,004}{0,8063} = 0,083$$

Keďže $Sk < 0,15$, ide o tepelne drobnú vsádzku. Pomerné teploty vsádzky na začiatku a na konci ohrevu Φ_0 , Φ_k stanovíme podľa vzťahov (5.5)

$$\Phi_0 = \frac{T_0}{T_p} = \frac{298,15}{953,15} = 0,3128 \qquad \Phi_k = \frac{T_1}{T_p} = \frac{923,15}{953,15} = 0,9685$$

Následne koeficient sálenia a pomerné teploty vsádzky dosadíme do vzťahu pre výpočet doby ohrevu tepelne drobnej vsádzky (5.4)

$$t_o = \frac{c_{vs} \cdot m_{vs}}{C_s \cdot S_{vs}} \cdot \frac{100}{\frac{T_p^3}{100^3}} \cdot \left(0,25 \cdot \ln \frac{1+\Phi_k}{1-\Phi_k} + 0,5 \cdot \arctan \Phi_k - 0,25 \cdot \ln \frac{1+\Phi_0}{1-\Phi_0} - 0,5 \cdot \arctan \Phi_0\right)$$

$$t_o = \frac{840 \cdot 2,6}{2,15 \cdot 0,25} \cdot \frac{100}{\frac{953,15^3}{100^3}} \cdot \left(0,25 \cdot \ln \frac{1+0,9685}{1-0,9685} + 0,5 \cdot \arctan 0,9685 - 0,25 \cdot \ln \frac{1+0,3128}{1-0,3128} - 0,5 \cdot \arctan 0,3128\right)$$

$$t_o = 518,51 \text{ s} = 8,64 \text{ min}$$

Vsádzka sa ohreje na danú teplotu za 8 minút a 38 sekúnd.

Konečne určíme užitočný príkon pece (príkon potrebný výhradne na ohrev vsádzky), a to podľa vzťahu (5.13)

$$P_{už} = \frac{Q_{vs}}{t_o} = \frac{1638000}{518,51} = 3159,1 \text{ W}$$

K nemu treba samozrejme pričítať tepelné straty skrz výmurovku pece. Pre ich stanovenie je treba vypočítať jej tepelný odpor a teplotu na jej vnútornom a vonkajšom okraji. Tepelný odpor plášťa pece zanedbávam vzhľadom na veľkú tepelnú vodivosť ocele.

Tepelný odpor výmurovky určíme zo vzťahu (5.9)

$$R_{vl} = \frac{h_{vým}}{\lambda_{vým}} = \frac{0,3}{0,11} = 2,73 \frac{\text{K} \cdot \text{m}^2}{\text{W}}$$

Tepelné straty oceľového plášťa zanedbávam vzhľadom na jeho malú hrúbku a vysokú tepelnú vodivosť ocele.

Celkový teplotný spád

$$\Delta T_c = T_p - T_o = 953,15 - 298,15 = 655 \text{ K} \qquad (6.2)$$

Teplotný spád výmurovkou, od výhrevných článkov až po jej vonkajší okraj určíme zo vzťahu (5.10) $\Delta T_1 = \Delta T_c \cdot \frac{R_{vl}}{R_c} = 655 \cdot \frac{2,73}{2,73} = 655 \text{ K}$

Kontrola výmurovky na maximálnu prevádzkovú teplotu spočíva v stanovení jej strednej hodnoty teploty, čiže priemeru medzi teplotami na rozhraniach „pracovná komora – výmurovka“ $\vartheta_p = 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ a „výmurovka – oceľový plášť“ $\vartheta_{\text{vým_ocel}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\vartheta_{\text{str-vým}} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_{\text{vým-ocel}}}{2} = \frac{680 + 25}{2} = 352,5\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (6.3)$$

Teplota na rozhraní „výmurovka – oceľový plášť“ je $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, čo je hodnota blízka predpokladanej teplote okolia. Navyše, určité teplo, aj keď nepatrné, sa zadrží aj v oceľovom plášti. Z toho usudzujem, že ďalšia vrstva tepelne izolačného materiálu nie je potrebná.

Maximálna prevádzková teplota použitého keramického vlákna je $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stredná hodnota teploty v tomto materiáli je $352,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, takže nedochádza k prehriatiu výmurovky pece.

Na 1 m^2 výmurovky pripadajú tepelné straty určíme zo vzťahu (5.11)

$$\Delta P_{js} = \frac{\Delta T_c}{R_c} = \frac{655}{1,136} = 239,93 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Celkové tepelné straty dostaneme po vynásobení jednotkových strát geometrickým priemerom všetkých 6 vonkajších a vnútorných povrchov stien podľa vzťahu (5.12)

$$\Delta P_{cs} = \Delta P_{js} \cdot \sqrt{S_{\text{vnút}} \cdot S_{\text{vonk}}} = 239,93 \cdot \sqrt{(1 \cdot 6) \cdot (1,69 \cdot 6)} = 5239,93 \cdot 7,8 = 1871,454\text{ W}$$

Sčítaním tepelných strát a užitočného príkonu vypočítame celkový príkon pece

$$P_{\text{celk}} = P_{už} + P_{cs} = 3159,1 + 1871,454 = 5030,554\text{ W} \quad (6.4)$$

Z vypočítaných hodnôt už jednoducho určíme elektrickú účinnosť pece zo vzťahu (5.15)

$$\eta = \frac{P_{už}}{P_{\text{celk}}} = \frac{3159,1}{5030,554} = 0,623$$

Navrhnutá pec pracuje s relatívne dobrou účinnosťou $62,3\%$. Bežne sa účinnosť elektrických odporových pecí s nepriamym ohrevom pohybuje od 55% až do 70% . [5]

Merná spotreba elektrickej energie sa určí podľa vzťahu (5.14)

$$W = \frac{Q_{už}}{m_{\text{vs}} \cdot t_o} = \frac{1638000}{2,6 \cdot 518,51} = 1215 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

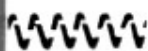
Na 1 kg vsádzky pripadá 1215 W elektrickej energie.

6.2 ELEKTRICKÝ VÝPOČET ODPOROVEJ PECE

Pre výpočet rozmerov výhrevných článkov je nutné najprv určiť ideálne povrchové zaťaženie výhrevných článkov. K tomu potrebujem vypočítať prúd, ktorým bude odporová pec napájaná

$$I = \frac{P_{\text{celk}}}{3 \cdot U_f} = \frac{5030,554}{3 \cdot 230} = 7,29\text{ A} \quad (6.5)$$

Podľa obr.6-1 volíme povrchové zaťaženie $p_{id} = 3,32 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, ktorému zodpovedá dovolenému prúdovému zaťaženiu 7,58 A a priemeru odporového drôtu $d_{zv} = 1 \text{ mm}$.



Proudové zatížení drátů vinutých do spirál na trn o průměru 1/8" (3.175 mm). Okolí: Klidný vzduch o teplotě cca 20° C.

Ø mm	200° C			400° C			600° C			700° C			800° C		
	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²
1.05	2.48	4.00	0.300	4.21	6.83	0.870	6.61	10.9	2.18	8.13	13.4	3.30	9.69	16.0	4.70
1.00	2.31	4.11	0.302	3.92	7.03	0.878	6.18	11.2	2.20	7.58	13.8	3.32	9.04	16.5	4.74
0.95	2.14	4.23	0.304	3.65	7.25	0.886	5.74	11.5	2.22	7.04	14.1	3.34	8.41	17.0	4.78
0.90	1.91	4.36	0.306	3.38	7.47	0.894	5.32	11.9	2.24	6.51	14.6	3.36	7.78	17.5	4.82
0.85	1.83	4.50	0.308	3.12	7.73	0.902	4.91	12.3	2.27	6.00	15.1	3.39	7.17	18.1	4.86
0.80	1.70	4.73	0.320	2.84	8.01	0.91	4.52	12.8	2.30	5.52	15.6	3.43	6.58	18.7	4.90
0.75	1.56	4.91	0.324	2.61	8.32	0.92	4.13	13.3	2.33	5.03	16.2	3.47	6.02	19.5	4.98
0.70	1.41	5.12	0.328	2.40	8.69	0.94	3.75	13.8	2.36	4.56	16.9	3.50	5.48	20.3	5.06
0.65	1.27	5.34	0.332	2.15	9.13	0.96	3.38	14.5	2.39	4.11	17.6	3.55	4.93	21.3	5.14
0.60	1.13	5.59	0.336	1.92	9.58	0.98	3.01	15.1	2.42	3.67	18.5	3.60	4.39	22.3	5.22
0.55	0.998	5.88	0.340	1.71	10.1	1.00	2.66	15.9	2.45	3.23	19.5	3.65	3.89	23.5	5.30
0.50	0.867	6.24	0.348	1.50	10.7	1.02	2.33	16.9	2.50	2.85	20.6	3.74	3.42	25.0	5.43
0.45	0.758	6.65	0.356	1.29	11.4	1.04	2.01	18.0	2.55	2.46	22.0	3.83	2.96	26.6	5.56
0.40	0.741	7.13	0.364	1.09	12.2	1.06	1.70	19.2	2.60	2.08	23.6	3.92	2.49	28.5	5.69
0.35	0.532	7.70	0.371	0.901	13.2	1.08	1.40	20.7	2.65	1.73	25.6	4.01	2.07	30.8	5.82
0.30	0.427	8.41	0.380	0.725	14.4	1.11	1.12	22.6	2.70	1.39	27.9	4.10	1.67	33.7	5.95

Obr.6-1: Dovolené zaťaženie výhrevných vodičov KANTHAL A1 [3]

Minimálny priemer výhrevného vodiča určíme zo vzťahu (5.18). Uvažujem s trojfázovým pripojením odporovej pece na elektrickú sieť, pričom vodiče sú zapojené do trojuholníka.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{(1 \cdot P_{celk})^2 \cdot \rho_{R680}}{(3 \cdot U_{zdr})^2 \cdot p_{id}} \cdot \frac{4}{\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{(1 \cdot 5030,554)^2 \cdot 1,479 \cdot 10^{-6}}{(3 \cdot 400)^2 \cdot 3,32 \cdot 10^4} \cdot \frac{4}{\pi^2}} = 0,682 \text{ mm}$$

Zvolený priemer $d_{zv} = 1 \text{ mm}$ zodpovedá kontrole na minimálny priemer výhrevných vodičov.

Prierez výhrevného vodiča

$$S = \frac{\pi \cdot d_{zv}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 0,78 \text{ mm}^2 \quad (6.6)$$

Dĺžka jedného fázového vodiča vypočítam podľa vzťahu (5.19)

$$l_{1F} = \frac{3 \cdot \pi \cdot U_{zdr}^2 \cdot d_{zv}^2}{4 \cdot P_{celk} \cdot \rho_{R20, \text{él}}} = \frac{3 \cdot \pi \cdot 400^2 \cdot 1^2}{4 \cdot 5030,554 \cdot 1,45} = 51,67 \text{ m}$$

Celková dĺžka všetkých fázových vodičov

$$l_{3F} = 3 \cdot l_{1F} = 3 \cdot 66,1 = 198,3 \text{ m} \quad (6.7)$$

Odpor jedného fázového vodiča pri teplote 20 °C

$$R_{20} = \rho_{R20, \text{el}} \cdot \frac{l_{1F}}{S_{\text{el}}} = 1,45 \cdot \frac{51,67}{0,78} = 96,04 \, \Omega \quad (6.8)$$

Odpor fázového vodiča pri prevádzkovej teplote, t.j. pri 680 °C

$$R_{680} = \rho_{R680, \text{el}} \cdot \frac{l_{1F}}{S_{\text{el}}} = 1,479 \cdot \frac{51,67}{0,78} = 97,97 \, \Omega \quad (6.9)$$

Taktiež môžeme vypočítať hmotnosť jedného fázového výhrevného vodiča podľa (5.20)

$$m_{1F} = \rho_{\text{el}} \cdot l_{1F} \cdot S_{\text{el}} = 7100 \cdot 51,67 \cdot 0,78 \cdot 10^{-6} = 0,286 \text{ kg}$$

Skutočné povrchové zaťaženie jedného fázového vodiča podľa vzťahu (5.16)

$$p_z = \frac{P_{\text{celk}}}{(3 \cdot \pi \cdot d_{\text{zv}} \cdot l_{1F})} = \frac{5030,554}{3 \cdot \pi \cdot 0,1 \cdot 51,67} = 1,033 \, \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Pôvodne zvolené povrchové zaťaženie bolo $p_{\text{id}} = 3,32 \, \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$. Výhrevné vodiče teda

vyhovujú na vypočítané povrchové zaťaženie p_z s niekoľkonásobnou rezervou, ktorú je vhodné uvažovať vzhľadom na vplyv vzájomného sálenia výhrevných vodičov, čo môže výrazne zvýšiť ich skutočné povrchové zaťaženie.

Keď už poznáme rozmery výhrevných článkov, môžeme prikrčiť k ich rozmiestneniu, čo je posledná fáza návrhu odporovej pece.

Vodiče budú namotané na keramickom nosníku z kordieritu, ktorý má jednu z najlepších odolností voči prudkým teplotným zmenám. Jeho maximálna prevádzková teplota je 1200 °C, čiže vyhovuje aj po tejto stránke. Jeho hlavnými zložkami sú Al_2O_3 a SiO_2 .

Stúpanie závitů volím ako 2,5-násobok priemeru drôtu, čiže $s = 2,5 \text{ mm}$. Vonkajší priemer špirály bude 6-násobok priemeru vodiča, teda $D = 6 \text{ mm}$.

Výpočet dĺžky jedného závitů sa určí jednoducho, pomocou Pytagorovej vety, podľa (5.20)

$$L_{1z} = \sqrt{s^2 + [\pi \cdot (D - d_{\text{zv}})]^2} = \sqrt{2,5^2 + [\pi \cdot (6 - 1)]^2} = 15,91 \text{ mm}$$

Nosník je upevnený na vnútorných stenách pece, jeho dĺžka je teda daná dĺžkou, resp. šírkou pece, čo je v tomto prípade $L_{\text{nos}} = 1 \text{ m}$.

Počet závitů na nosník vypočítame podľa vzťahu (5.21)

$$n_z = \frac{L_{\text{nos}}}{s} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 400$$

Na jeden nosník teda pripadá 400 závitů. Pri vynásobení tohto parametru dĺžkou jedného závitů určíme celkovú dĺžku drôtu na jeden nosník

$$L_{\text{drôt/nos}} = n_z \cdot L_{1z} = 400 \cdot 15,91 = 6364 \text{ mm} \quad (6.10)$$

Podielom dĺžky jedného fázového vodiča a dĺžky vodiča na jednom nosníku je celkový počet nosníkov, určený podľa rovnice (5.22)

$$n_{nos} = \frac{l_{1F}}{L_{drôt/nos}} = \frac{51,67}{6,364} = 8,12 \approx 9$$

Na jednu fázu teda potrebujeme 9 nosníkov, z toho jeden nemusí byť zaťažený do takej miery, ako tie ostatné. Avšak treba ešte overiť, aký počet nosníkov smie byť umiestnený na jednej stene pece. Vychádza sa zo stredného priemeru špirály $D = 6\text{ mm}$ a z výšky steny 1000 mm. S uvažovaním určitej vzdialenosti medzi nosníkmi, na jeden z nich bude pripadať 50 mm z výšky steny. Taktiež počítam s výškou steny zmenšenou o 20 cm (každý nosník bude od spodného a horného okraja vzdialený 10 cm). Výpočtová výška steny bude teda v tomto prípade 800 mm. Maximálny počet nosníkov, ktoré je možné umožniť na stenu pece je teda nasledovný

$$n_{nos, max} = \frac{800}{50} = 16 \quad (6.11)$$

Na jednu stenu je možné umiestniť 16 nosníkov. Pre dobrú prehľadnosť bude pripadať jedna stena na jeden fázový vodič, čiže 10 nosníkov na každú z bočných stien, a zvyšných 10 na zadnú stenu. Toto umiestnenie umožní aj väčšie rozostupy medzi výhrevnými vodičmi, čím sa zníži vplyv vzájomného sálania.

Pre kontrolu je vhodné prepočítať vyššie uvedené parametre, týkajúce sa usporiadania výhrevných článkov v peci.

Nové stúpanie závitů určíme podľa vzťahu (5.23)

$$s_{prepoč} = \frac{\pi \cdot (D - d)}{\sqrt{\frac{l_{1F}^2}{(n_{nos} \cdot L_{nos})^2} - 1}} = \frac{\pi \cdot (6 - 1)}{\sqrt{\frac{51,67^2}{(9 \cdot 1)^2} - 1}}$$

$$s_{prepoč} = 2,78 \text{ mm}$$

Nové stúpanie závitů je o 0,28 mm väčšie. Ostatné parametre sa prepočítavajú podľa rovnakých vzťahov, uvedených na predchádzajúcej strane. Prepočítaná dĺžka závitů je nasledovná

$$L_{1z, prepoč} = \sqrt{s^2 + [\pi \cdot (D - d_{zv})]^2} = \sqrt{2,593^2 + [\pi \cdot (6 - 1)]^2} = 15,95 \text{ mm} \quad (6.12)$$

Počet závitů na jeden nosník

$$n_{z, prepoč} = \frac{L_{nos}}{s_{prepoč}} = \frac{1}{2,78 \cdot 10^{-3}} = 359,7 \quad (6.13)$$

Dĺžka drôtu na jeden nosník

$$L_{drôt/nos, prepoč} = n_{z, prepoč} \cdot L_{1z, prepoč} = 359,7 \cdot 15,95 \approx 5,74 \text{ m} \quad (6.14)$$

Kontrola počtu potrebných nosníkov

$$n_{nos} = \frac{l_{1F}}{L_{drôt/nos, prepoč}} = \frac{51,67}{5,74} = 9 \quad (6.15)$$

S novou hodnotou stúpania závitů sa zmenšila dĺžka drôtu na jednom nosníku o 62,4 cm, a taktiež bude na každom z nich o 40 závitů menej. Drôt bude teda o trochu redšie navinutý, čím sa zníži vplyv vzájomného sáľania, aj keď pravdepodobne len nepatrne. Kontrola nám tiež potvrdila, že naozaj budeme potrebovať 9 nosníkov na jeden fázový vodič. Ich usporiadanie na jednotlivých stenách sa nám teda nezmení.

Zhrnutie výsledkov

Tab.4: Prehľad vypočítaných parametrov odporovej pece

Užitočný príkon pece	3159,1 W
Tepelné straty výmurovkou	1871,454 W
Celkový príkon pece	5030,554 W
Účinnosť pece	62,3%
Merná spotreba elektrickej energie	1215 W/kg

Tab.5: Rozmery výhrevných článkov

Priemer výhrevného vodiča	1 mm
Dĺžka vodiča 1 fázy	51,67 m
Celková dĺžka vodičov	155,01 m
Hmotnosť 1 fázevého vodiča	0,286 kg
Odpor 1 fázevého vodiča za studena	96,04 Ω
Odpor 1 fázevého vodiča pri prevádzkovej teplote	97,97 Ω
Skutočné povrchové zaťaženie 1 fázevého vodiča	1,033 W·cm ⁻²
Stúpanie závitů	2,78 mm
Dĺžka závitů	15,95 mm
Počet závitů na 1 nosník	359,7
Dĺžka drôtu na 1 nosník	5,74 m

ZÁVER

Predmetom bakalárskej práce bol návrh metodiky výpočtu odporových pecí s nepriamym ohrevom a praktická aplikácia navrhutej výpočtovej metódy na konkrétny typ pece.

V teoretickej časti sú popísané základné teoretické poznatky z oblasti zdieľania tepla z fyzikálneho hľadiska. Bližšie sme sa zamerali na prenos tepla pri nepriamom odporovom ohreve, pri ktorom sa teplo šíri prevažne sálaním – radiáciou. V ďalších kapitolách sme popísali najčastejšie používané typy odporových pecí z hľadiska ich konštrukcie a použitia, základné typy regulácií výkonu a teploty. Samostatná kapitola je venovaná kovovým výhrevným článkom, ktoré sa bežne používajú v praxi. Existuje aj viacero typov nekovových výhrevných článkov určených pre veľmi vysoké teploty, ale pre ich vyššiu cenu sa v bežných kaliacich odporových peciach nevyužívajú.

Najväčšiu pozornosť sme venovali metodike výpočtu odporových pecí. Metodika v sebe zahŕňa dva základné výpočty: tepelný a elektrický. Pri tepelnom výpočte sme na základe kalorimetrickej rovnice vypočítali teplo, potrebné na ohrev vsádzky. Pre výpočet užitočného elektrického príkonu pece je nevyhnutná aj znalosť doby ohrevu. Jej výpočet je odlišný pre rôzne hrúbky vsádzky, pričom rozlišujeme vsádzky tepelne masívne a tepelne drobné. Nakoľko sme sa v praktickej časti zaoberali tepelne drobnou vsádzkou, vychádzali sme pri výpočte doby ohrevu zo vzťahu (5.4), odvodeného z rovnice energetickej bilancie a rovnice pre výmenu tepla sálaním.

Pri tepelnom výpočte nesmieme zabudnúť na výpočet tepelných strát, ktoré závisia na type materiálu výmurovky pece a jeho hrúbke. Na základe znalosti užitočného elektrického príkonu a strát možno následne stanoviť celkový príkon a účinnosť pece amernú spotrebu elektrickej energie.

Cieľom elektrických výpočtov je stanovenie materiálu a tým aj rezistivity, rozmerov, povrchového zaťaženia, spôsobu uloženia výhrevných vodičov a spôsobu pripojenia na elektrickú sieť.

Vyššie popísanú metodiku sme použili pri návrhu odporovej pece na kalenie bežného sodnovápenatého skla. Teplotu kalenia skla sme stanovili na 650 °C a hrúbku vsádzky na 4 mm v súlade s hodnotami, ktoré používajú výrobcovia v reálnej praxi. Na výmurovku pece sme navrhli dosky z keramických hlinítokremičitanových vlákien s obchodným názvom SIBRAL Standart o hrúbke 300 mm. Na výrobu výhrevných článkov sa vzhľadom na nízke prevádzkové teploty ako najvýhodnejšia javila nemagnetická feritická zliatina s obchodným názvom KANTHAL A1. Vypočítaný optimálny priemer vodičov z tohto materiálu je 1 mm a celková dĺžka jedného fázového vodiča, navinutého na keramický nosník z KORDIERITU v tvare špirály, je 51,67 m.

Na ohrev jednej vsádzky o hmotnosti 2,6 kg na kaliacu teplotu je potrebný čas minimálne 8,64 minúty, pričom na 1 kg vsádzky sa spotrebuje elektrická energia 1215 W. Pec pracuje s celkovým príkonom 5030,554 W a účinnosťou 62,3 %.

Pri návrhu odporovej pece sme zanedbali vplyvy tepelného odporu vonkajšieho oceleového plášťa, koeficientu vzájomného tienenia výhrevných článkov, a výmenu tepla medzi vonkajším prostredím a pecou. Zahrnutie týchto parametrov by umožnilo spresniť uskutočnené výpočty, avšak podľa nášho názoru nie veľmi výrazne.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BROCKLEHURST, James. Wire alloys and their use in electrical resistance furnaces : Technical paper. Wire Journal International. January, 2010, 1, s. 58 – 63.
- [2] CLASIC - elektrické pece, měřicí a regulační technika [online]. 1996 - 2009 [cit. 2011-12-06]. CLASIC CZ s.r.o. Dostupné z WWW: <www.clasic.cz/>.
- [3] DRÁPELA, Jiří; BAXANT, Petr; LÁZNIČKOVÁ Ilona. Elektrotepelná technika: Skriptum. Brno : FEKT, VUT, 2009. 172 s.
- [4] Fiberfrax. UNIFRAX. *High Temperature Solutions for Global Markets* [online]. Copyright 2009 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.sibral.cz/web/goldminev2.nsf/>
- [5] HRADÍLEK, Zdeněk. Elektrotepelná technika : skriptum. Vysoká škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava : Fakulta elektrotechniky a informatiky, 1996. 234 s.
- [6] KANTHAL A-1. KANTHAL. *Resistance-heating-wire-and-resistance-wire* [online]. © 2010 — 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/kanthal-a-1/>
- [7] NOVÁK, Pavol; KOLESÁR, Juraj. Elektrotepelná technika : skriptum. Vysoká škola technická, Elektrotechnická fakulta, Košice : Alfa, Bratislava, 1990. 216 s.
- [8] Premeny elektrickej energie : skriptum. Košice : KEE, 2006. Výpočet elektrickej špirály, s. 1 - 21. Dostupné z WWW: <http://people.tuke.sk/dusan.medved/PEE/pee_cv_8.pdf>.
- [9] Průmyslové pece a sušárny LAC [online]. 2000 - 2011 [cit. 2011-12-06]. Produkty LAC. Dostupné z WWW: <www.lac.cz>.
- [10] RÁKOŠ, J. Elektrické teplo a elektrické pece : skriptum. Technická Univerzita, Hutnícka fakulta, Košice, 2000. 200 s.
- [11] Table of Emissivity Values. OMEGA ENGINEERING, INC. *Sensors, Thermocouple, PLC, Operator Interface, Data Acquisition, RTD* [online]. © COPYRIGHT 1996 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.ib.cnea.gov.ar/~experim2/Cosas/omega/emisivity.htm>
- [12] Tepelne tvrdené sklo. SGP. : *opracovanie skla, sklenené dvere, sprchovacie kúty, celosklenené systémy, kovanie na dvere* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.sgp.sk/12-3/kalene-sklo/>